



**Cátia Gouveia de Abreu**

Licenciada em Ciências da Engenharia Civil

## **Caracterização de betão com terra através de provetes laminares**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil- Perfil de Construção

Orientador: Maria Paulina Faria Rodrigues, Professora Associada,  
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Presidente: Prof. Doutor Miguel José das Neves Pires Amado

Arguente: Prof. Doutor Fernando Farinha da Silva Pinho

Vogal: Prof. Doutora Maria Paulina Santos Forte Faria Rodrigues



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Julho de 2013**





**Cátia Gouveia de Abreu**

Licenciada em Ciências da Engenharia Civil

## **Caracterização de betão com terra através de provetes laminares**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil- Perfil de Construção

Orientador: Maria Paulina Faria Rodrigues, Professora Associada,  
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Presidente: Prof. Doutor Miguel José das Neves Pires Amado

Arguente: Prof. Doutor Fernando Farinha da Silva Pinho

Vogal: Prof. Doutora Maria Paulina Santos Forte Faria Rodrigues



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA



‘Copyright’ Cátia Gouveia de Abreu, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



*Aos meus pais*





# AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a todos os que contribuíram para a realização desta dissertação:

Em especial gostaria de agradecer à Professora Doutora Paulina Faria, orientadora científica desta dissertação, pelos seus conselhos e pela total disponibilidade em ajudar a ultrapassar os obstáculos que foram surgindo, o que certamente facilitou o trabalho.

Ao Engenheiro Vítor Silva, por toda a sua ajuda no desenvolvimento da campanha experimental, e também pela sua amizade e boa disposição que acompanharam e alegraram todo este trabalho.

À Arquiteta Catarina Pereira pela realização dos ensaios de caracterização do solo utilizado.

À empresa ESLAM pela disponibilização das lajetas de betão com terra objeto de estudo deste trabalho.

Aos meus colegas Teresa Fontes, pela sua companhia, amizade e ajuda nos trabalhos, ao João Brito e ao Duarte Gomes pela ajuda na realização e desenvolvimento dos ensaios.

Com a finalização desta dissertação encerra-se um longo percurso da minha formação académica e não poderia deixar de expressar o meu agradecimento a todos os que dele fizeram parte, em especial:

Aos meus pais, Lena e Luís, por sempre me terem apoiado em todas as minhas decisões, pelo seu carinho e paciência ao longo da minha vida e por me terem proporcionado a oportunidade de realizar este percurso académico.

A toda a minha família, avós, tios, tias, primos e primas que sempre foram parte importante de todos os momentos.

Ao Gonçalo por todo o seu apoio, ajuda, amizade, carinho e paciência dentro e fora do percurso académico.

Aos meus colegas e amigos João Nabais, Diogo, Tiago, Maurício, João Valério, Lara e Márcio amigos sempre presentes dentro e fora do curso.

Às minhas amigas de sempre Isadora, Joana, Inês, Ana Queirós e Catarina que me acompanham há longos anos.



## RESUMO

Numa altura em que a economia e particularmente o setor da construção civil atravessam grandes dificuldades, a procura de novos mercados e o desenvolvimento de novos produtos desempenha um papel preponderante para garantir o sucesso. A crescente preocupação com a sustentabilidade na construção leva a que se revista de capital importância o desenvolvimento de produtos que contribuam para a diminuição da pegada ecológica causada pela construção. Com esta preocupação em mente e de forma a colmatar as elevadas necessidades habitacionais dos países em vias de desenvolvimento, surge o tema desta dissertação, inserido no projeto *Parede Ecoestrutural*.

Tendo como premissa estas necessidades, foram realizados estudos de caracterização e avaliação de provetes laminares em betão com terra como alternativa a soluções pré-fabricadas existentes em betão corrente, com vista à construção de edifícios de pequeno porte em países com necessidades habitacionais. Os resultados destes estudos são apresentados e discutidos no presente trabalho.

Face aos resultados registados, existe a possibilidade de utilização de soluções modulares pré-fabricadas em betão com terra, desde que as mesmas apresentem um traço ligante:agregado semelhante, ou ligeiramente inferior, ao já utilizado pela empresa em soluções de betão, aliado à substituição parcial de agregado por terra, sendo a proporção de substituição determinada pelo traço ligante:agregado, podendo esta ser tanto maior quanto mais forte for o traço.

**Termos chave:** Betão com terra, pré-fabricação, sustentabilidade, provetes laminares, construção



# ABSTRACT

In the current days, where the economy and particularly the construction industry struggles with major difficulties, the search of new markets and the development of new products has engaged a major role to the guaranty of success. With the increasing concern with sustainability in the construction industry, it becomes highly important the development of products that contribute to decrease the ecological footprint caused by this industry. With this concern in mind, and the need to solve the high needs of habitation in developing countries, comes the subject to this dissertation, as part of the project *Parede Ecoestrutural*.

Taking these needs in concern, studies were made to define and evaluate the laminar specimens made with earth concrete in alternative to the regular prefabricated solutions with regular concrete, taking the small construction in countries with needs in this area as main goal. Results from these studies are presented and discussed in the present dissertation.

It is possible to use prefabricated solutions with earth concrete, as long as they have the same binder:aggregate ratio, or a bit lower, as the already used by the company in current concrete solutions, combined with a partial replacement of the aggregate by earth. This proportion of replacement should be determined by the binder:aggregate ratio, becoming bigger as stronger as the ration gets.

**Keywords:** Earth concrete, prefabrication, sustainability, laminar specimens, construction



# ÍNDICE DO TEXTO

<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivo e metodologia .....	2
1.3. Organização do texto .....	2
<b>2. Estado do Conhecimento .....</b>	<b>3</b>
2.1. Betão como material para a construção .....	3
2.2. A terra na construção .....	3
2.3. Situação atual da construção com terra .....	4
2.4. Mistura de terra com cimento e betão com terra .....	8
2.5. Avaliação do comportamento.....	9
2.5.1. Ultrassons.....	10
2.5.2. Esclerómetro .....	11
2.5.3. Resistências mecânicas .....	13
2.5.4. Abrasão .....	14
2.5.5. Resistência ao ataque de sais solúveis .....	16
2.5.6. Absorção de água por capilaridade .....	16
2.5.7. Absorção de água sob baixa pressão através da utilização de tubos de Karsten .....	17
2.5.8. Secagem .....	18
2.5.9. Condutibilidade térmica .....	18
2.5.10. Resultados de outros autores .....	19
<b>3. Campanha experimental .....</b>	<b>23</b>
3.1. Provetes .....	23
3.1.1. Terra utilizada.....	23
3.1.2. Composições dos betões .....	25
3.1.3. Execução e cura das lajetas .....	26
3.1.4. Ensaio e cortes efetuados nas lajetas .....	26
3.2. Condutibilidade térmica.....	28
3.3. Módulo de elasticidade dinâmico- Ultrassons.....	30
3.4. Resistência e dureza superficial – Esclerómetro .....	34
3.5. Absorção de água sob baixa pressão - Tubos de Karsten .....	37
3.6. Absorção de água por capilaridade .....	40
3.7. Secagem .....	44
3.8. Resistência à tração por flexão.....	47
3.9. Resistência à compressão .....	50

3.10. Resistência ao ataque por sulfatos .....	52
3.11. Porosidade aberta .....	56
3.12. Abrasão seca .....	60
3.13. Abrasão húmida .....	64
<b>4. Discussão de resultados .....</b>	<b>67</b>
4.1. Comportamento à ação da água.....	67
4.2. Parâmetros mecânicos .....	70
4.3. Resistências mecânicas e ao ataque por sulfatos .....	72
4.4. Comparação com resultados de outros autores .....	73
4.4.1. Comportamento mecânico .....	73
4.4.2. Comportamento face à ação da água .....	73
4.4.3. Comportamento térmico.....	73
<b>5. Conclusões.....</b>	<b>75</b>
5.1. Conclusões finais .....	75
5.2. Desenvolvimentos futuros .....	77
<b>Bibliografia .....</b>	<b>79</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>83</b>
Anexo I – Resultados individuais dos ensaios de resistências mecânicas .....	85
Anexo II – Resultados individuais de absorção de água por capilaridade .....	86
Anexo III – Resultados individuais de secagem .....	88
Anexo IV – Resultados individuais de porosidade aberta e massa volúmica .....	90
Anexo V – Resultados individuais de resistência ao ataque por sulfatos .....	91
Anexo VI – Resultados individuais de dureza superficial .....	93
Anexo VII – Resultados individuais de tubos de Karsten .....	97
Anexo IX – Resultados individuais de ultrassons .....	98
Anexo IX – Resultados individuais de condutibilidade térmica .....	100



# ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Diagrama estabelecido pelo CRATerre das diferentes famílias de sistemas de construção antigos e modernos, que utilizam terra como matéria-prima.....	6
Fig. 2.2 – Modos de propagação das ondas ultrassónicas.....	10
Fig. 2.3 – Esclerómetro de Schmidt pendular (a); Esclerómetro de Schmidt (b).....	12
Fig. 2.4 – Diferentes tipos de tubos de Karsten para paramentos verticais (a) (b) (c) (d) e para paramentos horizontais (e) .....	18
Fig. 3.1 – Curva granulométrica do solo utilizado nos betões .....	24
Fig. 3.2 – Curva de compactação (PROCTOR) .....	24
Fig. 3.3 – Corte de lajeta com máquina Jumbo (a); Presença de grandes aglomerados de terra no provete (b); Corte dos provetes com rebarbadora (c);.....	27
Fig. 3.4 – Sequência esquemática dos ensaios realizados nos provetes .....	28
Fig. 3.5 – Ensaio de condutibilidade térmica.....	29
Fig. 3.6 – Condutibilidade térmica dos betões .....	30
Fig. 3.7 – Ensaio de ultrassons(a); Aparelho de leitura (b).....	32
Fig. 3.8 – Valores do módulo de elasticidade dinâmico.....	33
Fig. 3.9 – Ensaio com esclerómetro tipo N (a); Ensaio com esclerómetro do tipo PT (b)(c).....	35
Fig. 3.10 – Valores de dureza superficial (DS).....	36
Fig. 3.11 – Aplicação tubos de Karsten (a); Início do ensaio (b); .....	37
Fig. 3.12 – Final do ensaio de absorção de água sob baixa pressão.....	38
Fig. 3.13 – Curvas de absorção de água sob baixa pressão por unidade de área em função da raiz do tempo .....	39
Fig. 3.14 – Coeficiente de absorção de água em ambas as faces aos 60 min. de ensaio.....	39
Fig. 3.15 – Reposição de água durante o ensaio (a); Pesagem dos provetes (b).....	41
Fig. 3.16 – Coeficientes de capilaridade dos betões .....	42
Fig. 3.17 – Valores assintóticos dos betões.....	43
Fig. 3.18 – Curvas de absorção de água por capilaridade .....	43
Fig. 3.19 – Ensaio de secagem (a); Condições de secagem (b) .....	45
Fig. 3.20 – Curvas de secagem dos betões.....	46
Fig. 3.21 – Taxa de secagem dos betões .....	46
Fig. 3.22 – Índice de secagem dos betões.....	47
Fig. 3.23 – Ensaio de resistência à tração por flexão (a); Aglomerados de terra no betão C (b); Poros/vazios de grandes dimensões no betão padrão .....	48
Fig. 3.24 – Resistência à tração por flexão dos betões .....	49
Fig. 3.25 – Ensaio de compressão.....	50
Fig. 3.26 – Resistência à compressão dos betões .....	51
Fig. 3.27 – Resistência à compressão antes e após contacto com água .....	52

Fig. 3.28 – Sulfato de sódio anidro (a); Imersão dos provetes em solução na solução (b); Provetes em estufa ventilada a 100°C (c) .....	54
Fig. 3.29 – Evolução da variação de massa dos betões no ensaio de resistência aos sulfatos .....	55
Fig. 3.30 – Cavidade deixada após a desagregação de aglomerado de terra no provete (a); Rutura devido à ação dos sulfatos em provete do betão B (b) .....	55
Fig. 3.31 – Betões após 20 ciclos de secagem/imersão em sulfatos .....	56
Fig. 3.32 – Exsicador em vácuo e com água (a); Pesagem do provete saturado (b); Pesagem do provetes submerso (c) .....	58
Fig. 3.33 – Porosidade aberta dos betões .....	59
Fig. 3.34 – Massa volúmica aparente dos betões .....	60
Fig. 3.35 – Máquina de desgaste .....	62
Fig. 3.36 – Escova de desgaste com os pesos .....	62
Fig. 3.37 – Face lisa (a) e face rugosa (b) do betão A após o ensaio de abrasão .....	63
Fig. 3.38 – Face lisa (a) e face rugosa (b) do betão B após o ensaio de abrasão .....	63
Fig. 3.39 – Face lisa (a) e face rugosa (b) do betão C após o ensaio de abrasão .....	64
Fig. 3.40 – Face lisa (a) e face rugosa (b) do betão C após o ensaio de abrasão .....	64
Fig. 3.41 – Placa de proteção (a); Ponteira de dispersão (b); Manómetro com pressão de 0,5 bar (c) .....	65
Fig. 3.42 – Mecanismo em funcionamento .....	65
Fig. 3.43 – Face lisa de lajeta de betão C antes do ensaio (a); após o ensaio (b) .....	66
Fig. 3.44 – Face rugosa de betão C face rugosa após o ensaio .....	66
 Fig. 4.1 – Índice de secagem, valor assintótico e porosidade aberta dos betões .....	69
Fig. 4.2 – Taxa de secagem e coeficiente de capilaridade dos betões .....	69
Fig. 4.3 – Coeficiente de capilaridade e coeficiente de absorção de água aos 60 minutos das faces lisas e rugosas dos betões .....	69
Fig. 4.4 – Módulo de elasticidade dinâmico ( $v=0,2$ ), resistência à tração e à compressão dos betões	71
Fig. 4.5 – Módulo de elasticidade dinâmico ( $v=0,3$ ), resistência à tração e à compressão dos betões	71
Fig. 4.6 – Dureza superficial em ambas as faces das lajetas e resistência à compressão dos betões	71
Fig. 4.7 – Dureza superficial e coeficiente de abrasão de ambas as faces dos betões .....	72

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Principais técnicas construtivas com terra .....	5
Quadro 2.2 – Tipos de esclerómetro, energia de impacto e tipo de aplicações .....	13
Quadro 2.3 – Classe de resistência à compressão de betões.....	14
Quadro 2.4 – Valores de resistência à compressão por outros autores .....	19
Quadro 2.5 – Valores de resistência à compressão por Guettala <i>et al.</i> (2006) .....	20
Quadro 2.6 – Valores obtidos em provetes de taipa .....	21
Quadro 2.7 – Valores de coeficiente de capilaridade em adobes.....	21
Quadro 2.8 – Valores de coeficiente de capilaridade em BTC .....	22
Quadro 2.9 – Resultados do estudo de condutibilidade térmica de outros autores .....	22
Quadro 3.1 – Designação, dimensão e data de produção dos betões .....	25
Quadro 3.2 – Composição ponderal dos betões.....	25
Quadro 3.3 – Valores médios e desvios-padrão da condutibilidade térmica .....	30
Quadro 3.4 – Velocidade de propagação dos ultrassons .....	32
Quadro 3.5 – Valores do módulo de elasticidade dinâmico.....	33
Quadro 3.6 – Valores médios e de desvios-padrão de dureza superficial (DS) .....	36
Quadro 3.7 – Evolução da quantidade de água absorvida em ambas as faces.....	38
Quadro 3.8 – Valores médios e desvios padrão do coeficiente de capilaridade e do valor assintótico	42
Quadro 3.9 – Valores médios e de desvio padrão do índice de secagem e taxa de secagem .....	46
Quadro 3.10 – Valores médios e de desvio padrão da resistência à tração por flexão .....	49
Quadro 3.11 – Valores médios e desvios padrão da resistência à compressão dos betões .....	51
Quadro 3.12 – Valores médios e desvios padrão de resistência à compressão antes e após o contacto com água .....	52
Quadro 3.13 – Valores médios e de desvio padrão de porosidade aberta e massa volúmica aparente .....	59
Quadro 3.14 – Valores obtidos no ensaio de abrasão seca .....	62
Quadro 4.1 – Síntese de resultados dos ensaios realizados .....	68



# LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

## **Siglas:**

ACI – American Concrete Institute

ASTM – American Society for Testing and Materials

AENOR – Asociación Española de Normalización y Certificación

BSI – British Standards Institution

CEN – Comité Européen de Normalisation

CRATerre – Centre International de la Construction en Terre

DEC-FCT – Departamento de Engenharia Civil

EN – European Norm

ESLAM – Estruturas Laminadas Engenharia, Lda.

FCT-UNL – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

IPQ – Instituto Português da Qualidade

NP – Norma Portuguesa

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NZS – New Zealand Standards

## **Betões utilizados:**

A – Traço 1:3:1 [cimento:solo:brita] e relação A/C de 0,6

B – Traço 1:3:2 [cimento:solo:brita] e relação A/C de 0,6

C – Traço 1:6:4 [cimento:solo:brita] e relação A/C de 0,75

P – Traço 1:2:2 [cimento:areia:brita] e relação A/C de 0,75

Pa – Igual ao betão P, mas com uma malha metálica no seu interior

## **Ensaio e parâmetros:**

$C_a$  – Coeficiente de abrasão

CC – Coeficiente de absorção de água por capilaridade

$\sigma_p$  – Desvio padrão

DS – Dureza superficial

$E_d$  – Módulo de elasticidade dinâmico

IS – Índice de secagem

Méd – Valor médio

$MV_{ap}$  – Massa volúmica aparente

$R_c$  – Resistência à compressão

$R_t$  – Resistência à tração por flexão

TS – Taxa de secagem

VA – Valor assintótico de absorção de água por capilaridade

$\lambda$  – Condutibilidade térmica

$P_{ab}$  – Porosidade aberta

$W_t$  – Teor em água

$V_{us}$  – Velocidade de propagação dos ultrassons

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento

*“O betão é um material constituído pela mistura, devidamente proporcionada, de pedras e areia, com um ligante hidráulico, água e, eventualmente adjuvantes. A propriedade que os produtos da reação do ligante com a água têm de endurecer, confere à mistura uma coesão e resistência que lhe permite servir como material de construção”* (Coutinho, 1988).

*“Material formado pela mistura de cimento, agregados grossos e finos e água, com ou sem a incorporação de adjuvantes e adições, que desenvolve as suas propriedades por hidratação do cimento.”* (IPQ, 2007)

Esta dissertação foi realizada no âmbito do projeto QREN nº 2011/021586 - Parede Ecoestrutural, desenvolvido em co-promoção entre a empresa ESLAM - Estruturas Laminares Engenharia, Lda. e a Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT UNL), que decorre de 1 Setembro 2011 a 31 Agosto 2014.

O tema desta dissertação surge com o interesse no desenvolvimento de novas soluções modulares pré-fabricadas vocacionadas para construções de pequeno porte para países com necessidades prementes habitacionais. A ideia é que sejam prefabricados e exportados painéis delgados de betão armado que, depois de transportados e colocados em obra, possam vir a ser completados com um pano de alvenaria local em terra. A caracterização e otimização do funcionamento de argamassas mistas de terra e cal que sejam adequadas ao assentamento e revestimento destes panos estão a ser objeto de outras dissertações de mestrado.

De forma a reduzir os custos de produção e o impacto ambiental produzido pela utilização de estruturas de betão, foi colocada como hipótese inicial a otimização do betão do próprio painel, nomeadamente através da utilização de um betão mais ecológico que os correntemente utilizados para esse tipo de aplicação. Como possibilidade, foram produzidos pela ESLAM um betão corrente e diversos betões cuja composição variou, em termos de dosagem de ligante/agregados e de terra/agregado corrente. Com esses betões foram produzidos dois tipos de provetes: provetes cilíndricos e provetes laminares, estes em forma de lajetas, simulando secções dos painéis. Estes provetes foram caracterizados e ensaiados.

Na presente dissertação apresentam-se os procedimentos de ensaio seguidos ou especificamente desenvolvidos e os resultados dos ensaios de caracterização, mecânicos e físicos, dos provetes laminares dos diversos betões. Apresenta-se ainda a análise e a discussão desses mesmos resultados, com vista à avaliação da viabilidade dos betões e de painéis que venham a ser construídos a partir deles. A parte experimental foi desenvolvida em paralelo com uma outra dissertação, ainda em curso, que realizou a caracterização de provetes dos mesmos betões, mas com configuração cilíndrica.

## **1.2. Objetivo e metodologia**

Esta dissertação tem como objetivo avaliar as características de provetes laminares de betão em que é utilizada terra como constituinte, que se podem designar como betões com terra. A utilização da terra como substituto parcial de agregado tem como principal objetivo a diminuição do custo e do impacto ambiental causado pela exploração dos constituintes utilizados na fabricação do betão.

Desta forma, pretende-se com este estudo contribuir para o aumento do conhecimento deste novo material, apresentando valores de referência para estudos futuros.

Para avaliação das características dos betões com terra determinam-se as propriedades físicas e mecânicas de três misturas distintas de betão contendo cimento, solo, brita e água, sob a forma de lajetas, comparando-as com um betão corrente e avaliando as vantagens e desvantagens entre as diferentes composições de betão para este tipo de aplicação. Nas lajetas de betão com terra existiu uma variação do traço ligante:agregado, assim como foram testadas diferentes substituições de brita:solo nos agregados utilizados, na busca de uma solução mais otimizada.

Foi também feita uma pequena análise ao estado dos conhecimentos relativo às diferentes soluções construtivas que utilizam a terra como matéria-prima, de forma a avaliar qual a solução potencialmente mais vantajosa para utilizar em conjunto com o betão com terra, principal objeto de estudo deste trabalho.

## **1.3. Organização do texto**

A dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos. Neste primeiro capítulo é apresentado o enquadramento do tema, assim como são definidos o objetivo e é explicitada a estrutura do texto da dissertação.

No segundo capítulo será apresentado o estado atual do conhecimento, onde é feita uma contextualização histórica da utilização do betão e da terra como materiais construtivos. É também feita uma descrição de alguns materiais que utilizam a mistura de terra com cimento, assim como a utilização de betão com terra, e apresentados alguns procedimentos de ensaio consultados e respetivas gamas de valores obtidos.

No terceiro capítulo é feita uma caracterização do solo usado como agregado nos betões com terra, explicitadas as diferentes composições usadas nos diferentes betões e são descritos os procedimentos ensaio utilizados na campanha experimental. Após a descrição dos procedimentos de ensaio, são apresentados e analisados os resultados obtidos com o auxílio de quadros e figuras.

No quarto capítulo são discutidos os resultados obtidos, cruzando os resultados dos vários ensaios realizados e, sempre que possível, é feita uma comparação com valores de referência provenientes da bibliografia consultada.

No quinto capítulo está presente uma síntese das conclusões retiradas na elaboração deste trabalho, assim como são apresentadas algumas propostas para desenvolvimentos futuros para a continuidade e aprofundamento do estudo e desenvolvimento deste material.

Finalmente são apresentadas as referências bibliográficas consultadas e os anexos à dissertação.



## **2. ESTADO DO CONHECIMENTO**

### **2.1. Betão como material para a construção**

A utilização da mistura de pedras e areia com ligante em construção remonta aos tempos da antiguidade, sendo que as mais antigas construções não chegaram aos dias de hoje, provavelmente porque a argila seria utilizada como ligante e esta, não sendo cozida, volta a perder dureza e poder aglutinante sob ação da água. A construção mais antiga de betão de que há relato data de 5600 a.c. e encontra-se na zona da antiga Jugoslávia, tratando-se de um pavimento térreo em que o ligante utilizado é a cal. Este tipo de construção estendeu-se à zona mediterrânica através das construções efetuadas pelos romanos, que utilizavam misturas de pedras e areia, cal e água na construção de obras públicas de grande envergadura (Coutinho, 1988).

Durante a idade média e o renascimento o uso deste material manteve-se e, após a invenção do cimento Portland por Louis Vicat, foi autorizada a sua primeira utilização na construção da ponte de Souillac sobre o rio Dordogne em 1819. Em 1848 Joseph-Louis Lambot constrói um barco apresentado na exposição Universal de Paris utilizando betão armado, dando um grande impulso à sua expansão. Entre os anos de 1852-1854 inicia-se a utilização de betão armado em pavimentos (lajes e vigas) por Francois Coignet e William Wilkinsen, sendo esta a principal utilização deste material (Appleton, n.d.).

No início do século XX iniciou-se a utilização com mais frequência do betão armado como material de construção graças aos estudos experimentais e teóricos efetuados por Considère, Mesnager e Rabut, que criam a primeira disciplina de betão armado na École National de Ponts et Chaussées (Paris) (Appleton, n.d.; Coutinho, 1988).

O estudo das propriedades mecânicas e físicas do betão conduziu a um nível de conhecimento profundo do comportamento deste material, criando comportamentos expectáveis perante situações adversas, o que permitiu o desenvolvimento de regulamentos de construção, de forma a estabelecer padrões de segurança que têm de ser respeitados de forma a evitar e prevenir acidentes.

O seu bom desempenho, aliado à sua trabalhabilidade, que lhe permite tomar praticamente qualquer tipo forma, fez com que o betão se impusesse como principal produto utilizado na construção.

### **2.2. A terra na construção**

A utilização da terra como material de construção é algo transversal a todas as civilizações antigas, não só na construção de edifícios de pequeno porte, como também na construção de edifícios de maior porte, como palácios e edifícios de cariz religioso e social. A construção mais antiga conhecida data de há cerca de 10000 anos e trata-se da cidade mais antiga do mundo, Jericó (Houben & Guillaud, 1994). Crê-se que o início da construção com terra coincidiu com o início do desenvolvimento da agricultura. Ao longo da história, grandes monumentos das civilizações antigas utilizaram terra como matéria-prima de construção, como é o caso da grande muralha da China que,

com cerca de 4000 anos de idade, foi originalmente construída em taipa, tendo apenas posteriormente sido coberta com pedra e tijolo conferindo-lhe assim o seu atual aspeto (Minke, 2006). As primeiras povoações europeias surgiram em 6000 a.c. e eram constituídas por madeira e argila, que posteriormente evoluíram para construções com tijolos de terra secos ao ar em 4600 a.c. Há muitos séculos, em zonas climáticas secas onde a existência de madeira era escassa, desenvolveram-se novas técnicas onde os edifícios eram cobertos com adobes ou outros tipos de tijolos de argila em cúpulas para cobertura, realizadas sem qualquer tipo de suporte durante a construção.

No norte da Europa, o exemplo mais antigo descoberto de construção em tijolos de argila encontra-se no forte de Heuneburg na Alemanha e pertence ao século VI.

Sabe-se também da existência de fortes em taipa construídos no final do ano 100 na Ibéria, mais concretamente no território que pertence atualmente a Espanha. O uso da taipa na Península Ibérica intensificou-se no período de domínio muçulmano neste território, que se traduziu sobretudo na construção de fortificações, como por exemplo os castelos de Alcácer do Sal, de Moura, da Juromenha, de Paderne, de Salir e de Silves (Bruno, 2001). Com o domínio desta técnica construtiva e com as conquistas na América Central e do Sul, os povos ibéricos foram responsáveis pela sua introdução nesta região, onde os edifícios eram principalmente construídos em adobe (Minke, 2006).

No período de declínio da Idade Média, a construção com terra foi abandonada na Europa, sendo substituída por construções em madeira, mais rudimentares, que prevaleceram até aos finais da Idade Média. Apenas no século XVIII a construção com terra foi retomada na Europa, graças ao desenvolvimento das populações e movidas pelo objetivo de levar eletricidade ao interior das habitações, o que levou a grandes desenvolvimentos na construção com taipa, passando a mesma a ser considerada como construção barata, durável e salubre. A construção com terra manteve-se até à década de 50 do século passado, colmatando as grandes necessidades de habitação e de reconstrução da Europa após a Segunda Guerra Mundial (1939-1945). No entanto, desde então, a utilização da terra na construção caiu em desuso, voltando a ser objeto de interesse e investigação apenas há umas décadas atrás, por razões de sustentabilidade (Houben & Guillaud, 1994; Azevedo, 2010).

### **2.3. Situação atual da construção com terra**

Apesar da sua história, a terra não deve ser encarada apenas como um material de construção ancestral. Hoje em dia é ainda um material de construção para mais de mil e quinhentos milhões de pessoas que habitam em construções de terra em todo o mundo (Toirac-Corral, 2008). Estima-se aliás que, atualmente, entre 30 a 50% da população habite ou trabalhe em edifícios de terra.

*“Por arquitetura em terra entende-se toda e qualquer construção edificada em terra crua, ou seja, todas as construções que utilizem a terra como matéria-prima sem alteração das suas características mineralógicas. Estão assim excluídos todos os materiais cerâmicos que alteram, no seu processo de cozedura, as características iniciais da terra que é apenas seca ao sol”* (Fernandes, 2006).

Segundo Houben e Guillaud (1994) entre as infinitas variedades de métodos construtivos com terra existentes, são doze os principais métodos construtivos reconhecidos, entre os quais sete são os mais utilizados correntemente e representam as principais técnicas construtivas, apresentados no Quadro 2.1 e na Figura 2.1.

Quadro 2.1 – Principais técnicas construtivas com terra  
Adaptado de Houben & Guillaud (1994)

Método	Descrição
Adobe	Blocos de terra secos ao ar, feitos com terra argilosa à qual é, por vezes, adicionada palha ou areia e com os quais se realizam alvenarias. Podem ser de realização manual ou mecanizada.
Taipa (Rammed Earth)	Terra humedecida compactada dentro de uma cofragem (taipal), geralmente de madeira: método que permite a construção de paredes monolíticas.
Terra-Palha (Straw-Clay)	Solo bastante argiloso misturado com água, formando uma pasta (barbotina) que é adicionada à palha e funciona como ligante: técnica utilizada principalmente na pré-fabricação de componentes utilizados na construção, como blocos.
Tabique (Wattle and Daub)	Revestimento com terra rica em argila, por vezes utilizada juntamente com palha para evitar a fendilhação após secagem, de estruturas de madeira ou de outro material vegetal.
Terra modelada (Direct Shaping)	Técnica muito antiga que usa solo plástico de forma a ser moldado à mão diretamente, sem recorrer ao uso de moldes.
Blocos de terra comprimida (Compressed Earth Blocks)	Terra humedecida comprimida dentro de moldes de madeira ou metálicos para alvenaria. Atualmente são utilizadas prensas mecânicas especialmente desenvolvidas para a fabricação de BTC em maior escala.
Terra empilhada (Cob)	Técnica que consiste em empilhar pequenas bolas de terra umas em cima das outras, apertando-as ligeiramente com as mãos ou os pés, formando paredes monolíticas. A terra poderá ser reforçada com fibras, geralmente utilizando palha, podendo também ser usadas outras fibras vegetais; as paredes podem ser aparadas lateralmente.

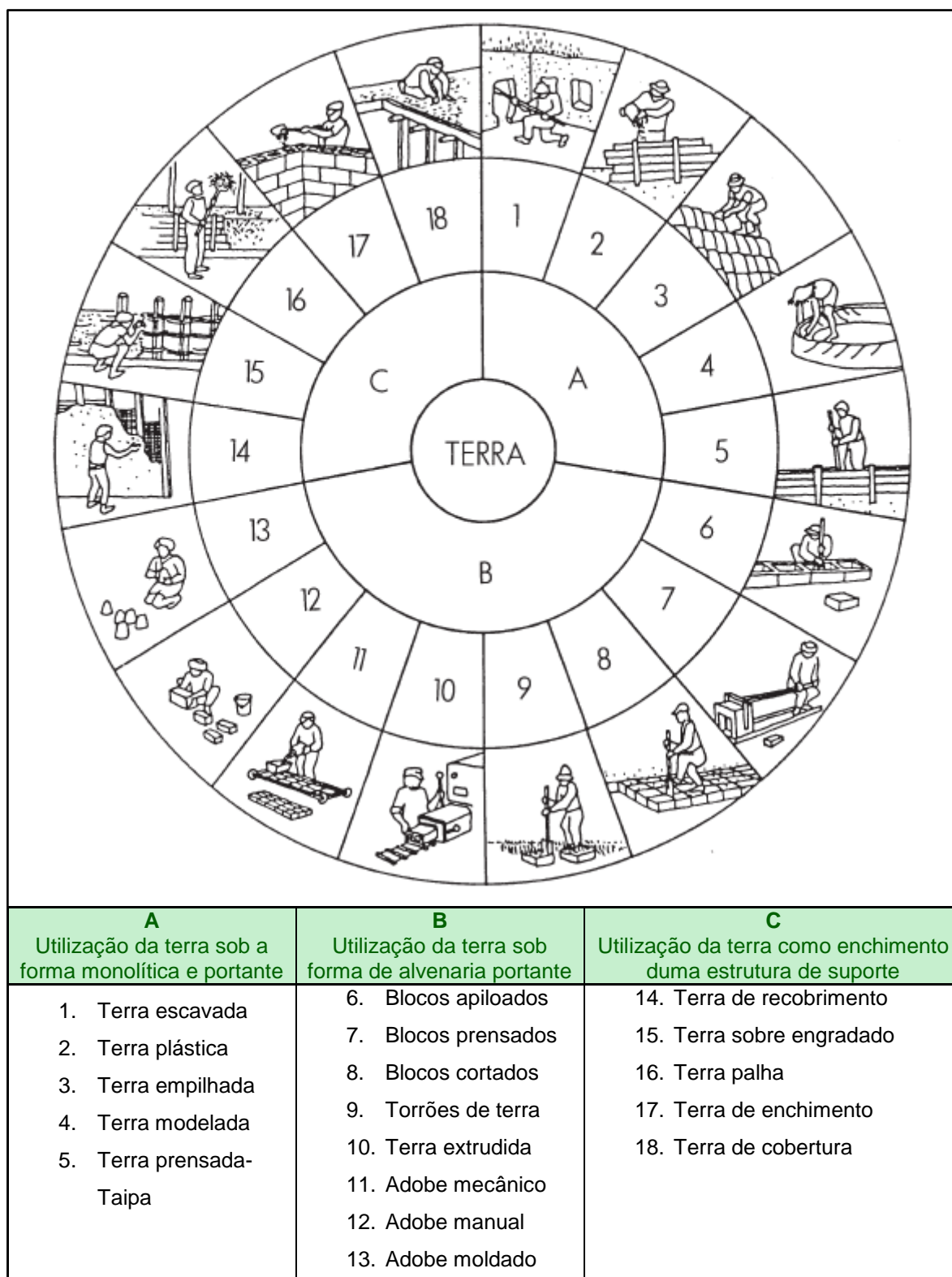


Fig. 2.1 – Diagrama estabelecido pelo CRATerre das diferentes famílias de sistemas de construção antigos e modernos, que utilizam terra como matéria-prima  
(Fernandes, 2006)

No que à construção nova diz respeito, é nos países em vias de desenvolvimento que se regista maior número de habitações construídas por ano, nomeadamente na América Latina, Ásia e

África, havendo no entanto registo de construção de conjuntos de habitações em terra em países desenvolvidos como a França ou os E.U.A., entre outros.

A crescente preocupação com as questões ambientais propulsionou novos estudos, numa tentativa de retomar a construção com este material, cujas vantagens são conhecidas, nomeadamente no que à sustentabilidade diz respeito. Nesse sentido, alguns países estão a desenvolver normas de construção com terra, como é o caso de Espanha, que publicou em 2010 a norma UNE 41410:2008 (2008), que define especificações e métodos de ensaio de blocos de terra comprimida. Na Alemanha a primeira regulamentação de construção com terra surge em 1944, sendo que apenas em 1951 essa regulamentação foi posta em prática com o DIN 18951; foram feitas constantes atualizações, datando de 2008 a última versão do “Lehmbau Regeln” atualmente utilizado para construções com terra; ainda relativamente à Alemanha, vão ser disponibilizadas em Agosto de 2013 três normas relativas à construção em terra, nomeadamente relativas a argamassas para rebocos, para assentamento de alvenarias e a BTC. A Austrália, foi dos primeiros países a criar uma regulamentação própria para a construção com terra, que atualmente é regida pelo Australian Earth Building Handbook (Walker & Standards Australia, 2002). A Nova Zelândia é considerado o país mais avançado no que a este assunto diz respeito, apresentando regulamentação legal para a construção com terra, estando esta dividida em três partes NZS 4297:1998, NZS 4298:1998 e NZS 4299:1998 em que são regulamentados diversos fatores a ter conta na construção, adaptados à construção com terra (Pacheco-Torgal & Jalali, 2012).

O Zimbabwe tem também regulamentação, embora baseada na da Nova Zelândia (Gomes *et al.*, 2012).

Com a industrialização dos materiais com terra torna-se possível melhorar as suas características naturais, garantido assim qualidades ótimas para a aplicação em obra, diminuindo o tempo de aplicação dos materiais (Bestraten *et al.*, 2011).

No entanto, apesar das mais diversas técnicas desenvolvidas e de todas as provas já dadas da viabilidade, sustentabilidade e das vantagens da construção com terra, esta continua a ser vista com desconfiança pela população em geral, conotando este tipo de construção como pobre e sem qualidade, fruto da falta de informação sobre estas técnicas, preconceito também originado pelo próprio sistema de ensino que se encontra maioritariamente voltado para as técnicas construtivas industrializadas.

Existe atualmente em todo o mundo um movimento de consciencialização a favor da construção sustentável e pensada de forma a diminuir o impacto ambiental provocado por um dos maiores setores mundiais da indústria, o da construção. O facto de haver construção com terra a decorrer em diversos países, com diferentes níveis de desenvolvimento, que vão desde os E.U.A., à Austrália, ao Brasil, passando por Angola, França, Alemanha, França e Portugal, prova assim que este não se trata de um tipo de construção associado apenas a países com populações mais pobres, existindo também um grande esforço por parte de quem procura este tipo de solução construtiva, por integrar as populações nos trabalhos, de forma a desfazer estes preconceitos, informando-as corretamente, aumentando a aceitação por parte das mesmas e potenciando o crescimento da construção com terra.

## 2.4. Mistura de terra com cimento e betão com terra

Apesar de todas as vantagens já mencionadas da construção com terra, a verdade é que nem todos os tipos de terra disponíveis apresentam as características ideais para a sua utilização como material de construção, tornando-se assim por vezes necessário melhorar as suas propriedades. Essas melhorias podem ser feitas através da modificação da sua granulometria, adicionando outro tipo de solo ou através da adição de estabilizadores, tais como o cimento, a cal, a palha, entre outros, tendo cada estabilizador um tipo de função específica que dependerá das propriedades necessárias para o fim a que a terra se destina (Neves *et al.*, 2005).

A mistura de terra com cimento pretende, principalmente, melhorar as características mecânicas do solo utilizado para fins construtivos. Este tipo de mistura pode ser utilizada em diversos campos de aplicação, desde materiais para construção habitacional até pavimentos rodoviários. No entanto também é reconhecido que a estabilização da terra através da adição de um ligante provoca uma grande alteração do material de construção, comparativamente à terra não estabilizada (Morel *et al.*, 2013).

A designação de solo-cimento é correntemente utilizada no tratamento de solos para fins rodoviários. Segundo a Portland Cement Association (2013) o solo-cimento é uma mistura de solo/agregado, cimento portland e água, altamente compactada, distinguindo-se do betão geralmente utilizado em pavimentação. As diferenças entre ambos prende-se com o facto da mistura utilizada nos pavimentos de betão conter pasta suficiente (mistura de água com cimento) para cobrir toda a superfície dos agregados, assim como para preencher os espaços vazios existentes entre estes, enquanto que no solo-cimento essa pasta não é suficiente para cobrir todas as partículas de solo nem os espaços vazios entre elas. Este tipo de solução é principalmente utilizada na construção de camadas de base para estradas, ruas e pistas de aviação, assim como na pavimentação de áreas de estacionamento, de armazenamento para materiais diversos, de passeios e pistas de ciclismo (Dias, 2012). A utilização desta técnica em detrimento de outras técnicas de estabilização de solos prende-se com o facto de esta apresentar uma elevada redução dos recursos naturais utilizados; com efeito, 90% do material utilizado na produção do solo-cimento, poderá ser obtido no local da obra (solo), sendo apenas necessário o transporte de 10% do material (cimento), o que torna esta solução mais sustentável e mais económica (Foppa, 2005).

A utilização de solos estabilizados com cimento não se limita apenas à área da geotecnia, sendo igualmente utilizado na produção de edificações. Após o desenvolvimento do solo-cimento como material de aplicação para fins rodoviários surgiu o interesse de aplicar a mesma técnica para fins habitacionais. Embora tenham existido algumas tentativas de utilização de solo-cimento em paredes, as informações existentes são bastante escassas, havendo no entanto relatos de algumas tentativas nesse sentido, principalmente no desenvolvimento de tijolos e blocos. A utilização desta técnica para fins habitacionais foi fortemente impulsionada com a publicação da obra *“Construcción con tierra”* pelo Centro Regional de Ayuda Técnica do México que reúne toda a bibliografia disponível até à data (1956), relatando igualmente uma experiência realizada em Israel, e pelo desenvolvimento de um modelo bastante simples de uma prensa manual para a fabricação de tijolos pelo Centro Interamericano de Viviendas y Planeamiento, na Colômbia, prensa essa que é atualmente

conhecida como Cinva Ram, e pela publicação do livro “Suelo-cemento: su aplicación en la edificación” em 1963 (Neves, 2005).

Com o desenvolvimento da prensa manual para a fabricação de tijolos e posteriormente com o aparecimento de prensas automáticas, este método construtivo tornou-se bastante popular, especialmente em países com grandes carências habitacionais, como é o caso de alguns países sul-americanos. Por se tratar de um método de construção simples, rápido e de baixo custo, que não requer conhecimentos técnicos especializados, houve uma boa aceitação por parte das populações relativamente a esta técnica, pois são estas que, em certa medida, ficam responsáveis pela construção das habitações, criando um movimento de entreajuda dentro das comunidades. A disseminação desta técnica construtiva levou a que houvesse espaço para o desenvolvimento de novos equipamentos, havendo assim uma evolução nos blocos utilizados que, inicialmente se apresentavam como simples blocos paralelepípedicos, até aos mais recentes que, atualmente, já permitem a passagem de tubagens no seu interior diminuindo assim o tempo de execução das obras.

A designação de solo-cimento em blocos para edificações poderá ser incluída na família dos blocos de terra comprimida, uma das mais antigas técnicas de construção com terra, e que com a evolução, especialmente nos últimos 50 anos, levou à introdução de elementos de estabilização destes blocos recorrendo a diferentes tipos de adições de forma a melhorar as suas características, com o objetivo de diminuir os problemas de erosão causados pelo contacto com a água e devido à ação do vento, entre outros (Villamizar *et al.*, 2012). Em algumas publicações esta solução é também referenciada como betão com terra (*earth concrete*), não sendo, no entanto, este o tipo de material objeto de estudo neste trabalho e aqui definido como betão com terra (Kharchi & Chaibeddra, 2012; Guettala *et al.*, 2006). Não foram encontrados registos de estudos efetuados em materiais semelhantes a betão com terra em que a sua composição é semelhante à de um betão corrente, distinguindo-se apenas por apresentar uma substituição parcial de uma fração de agregado por solo.

## 2.5. Avaliação do comportamento

O estudo das ações mecânicas e de durabilidade é um dos parâmetros determinantes para a avaliação das características dos materiais. Como tal, foram analisados métodos não destrutivos, como ensaios de ultrassons e esclerómetro, e métodos destrutivos, como os ensaios de resistências mecânicas, abrasão e resistência aos sais solúveis.

O estudo do comportamento dos materiais face à ação da água revela ser um parâmetro fulcral para a determinação do seu campo de aplicação, e também de durabilidade. Todos os materiais construtivos aplicados que estejam em contacto com o exterior sofrem a ação direta ou indireta da água. Torna-se assim necessário estudar o seu comportamento face à ação da água, determinando medidas preventivas, de forma a minimizar os efeitos, por vezes nefastos, desta ação. É ainda abordada a questão da condutibilidade térmica.

São apresentados resultados de outros autores relativos à avaliação do comportamento, consultados a partir de bibliografia.

### 2.5.1. Ultrassons

As primeiras referências existentes sobre a medição da velocidade de propagação de ondas geradas mecanicamente através de betão remontam a meados dos anos 40 do século passado nos E.U.A. (Bungey *et al.*, 2006). Constatou-se que a velocidade de propagação das ondas dependia, maioritariamente, das propriedades elásticas do material e que esta era pouco influenciada pela sua geometria. Apesar do potencial desta descoberta, existiam problemas relacionados com a precisão dos valores obtidos na realização de medições, levando ao desenvolvimento em França de um equipamento de impulso mecânico repetitivo.

Sensivelmente na mesma altura realizavam-se no Canadá e no Reino Unido estudos utilizando transdutores eletroacústicos que proporcionavam um controlo do tipo e frequências geradas. Esta técnica de ensaio foi sendo desenvolvida dando origem aos equipamentos atualmente utilizados para a medição da velocidade de propagação de ondas ultrassónicas, que utilizam frequências ente os 20-150 kHz geradas e registadas por circuitos elétricos (Bungey *et al.*, 2006).

Como já foi anteriormente referido, este ensaio mede a velocidade de propagação de ondas através do elemento de betão (ou outro material) em estudo. Para tal é utilizado um equipamento em que um gerador de impulsos emite um sinal de alta-voltagem e de curta duração a um transdutor, provocando uma vibração no transdutor com a sua frequência de ressonância. No início da transmissão dos impulsos elétricos é iniciado um temporizador eletrónico. As vibrações do transdutor são transmitidas para o betão através de um fluido viscoso. O impulso das vibrações atravessa o elemento e estas são detetadas por outro transdutor, colocado na superfície do elemento a uma distância determinada. Quando o impulso é recebido, o temporizador eletrónico é desligado, sendo assim determinada a duração do percurso do impulso através do betão. Através da razão entre a distância e o tempo decorrido é determinada a velocidade de propagação das ondas no betão (ACI Committee 228, 2003).

Para a realização deste ensaio é essencial que exista um bom acoplamento entre a face do transdutor e a superfície do betão. A superfície do betão a ensaiar deverá ser lisa, regular e limpa (preferencialmente superfícies moldadas), para que esse acoplamento seja eficaz, devendo ainda ser aplicado um agente condutor (gel, massa, óleo). Neste ensaio os transdutores poderão ser colocados na superfície do elemento a ensaiar de três formas distintas (Figura 2.2), em que quanto maior for a distância entre os transdutores e menor o ângulo formado pelas normais exteriores às superfícies, maior será a atenuação da onda ao atingir o recetor. (Mendes, 2012)

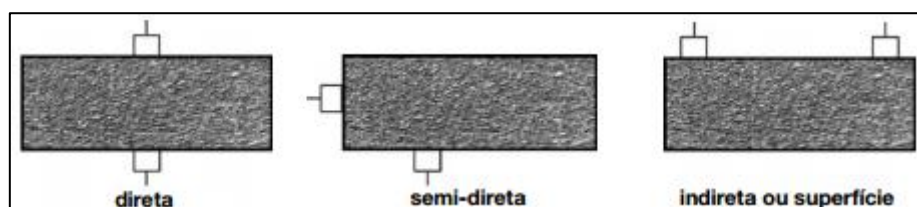


Fig. 2.2 – Modos de propagação das ondas ultrassónicas (PROCEQ, 2010)



O método de leitura direta é aquele que apresenta maior precisão nos seus resultados pois, para além do cálculo da distância entre os transdutores ser mais exato (desde que se consiga garantir a linearidade), a energia máxima de vibração é transmitida perpendicularmente à face dos transdutores, obtendo-se assim tempos de percurso mais fiáveis. Com o método de leitura semidirecta é também possível obter resultados bastante satisfatórios desde que a distância entre transdutores não seja muito grande, assim como o ângulo formado por estes. O cálculo da distância entre transdutores não é tão preciso como no caso da leitura direta, mas fazendo medições exatas entre os centros de contacto dos transdutores é possível obter valores bastante aproximados. Por último o método da leitura indirecta é aquele que apresenta resultados menos satisfatórios dado que a amplitude do sinal poderá ser inferior a 3% em relação ao método direto. A velocidade de propagação será fortemente influenciada pela superfície do betão, o que poderá não ser representativo do interior deste, para além de que a medição das distâncias de percurso da onda ficam sujeitas a muitas incertezas. No entanto este método é o mais eficaz para detetar a presença de eventuais fendas e estimar a sua profundidade (Nepomuceno, 1999).

Assim, é possível, através da realização deste ensaio, obter informações relativas à homogeneidade de um material, nomeadamente a presença de vazios ou a existência de fendas, em que materiais menos compactos apresentam valores de velocidade de propagação de ondas inferiores aos de materiais mais compactos. Podem ainda ser obtidas estimativas do módulo de elasticidade dinâmico do material, ou ainda relacionar, de certa forma, os valores obtidos com os valores de resistência à compressão do material.

Importa também salientar o facto de existirem outros fatores que influenciam as velocidades de propagação de ondas ultrassónicas, nomeadamente, a humidade do betão, a temperatura, as dimensões das peças em estudo, assim como a presença de armaduras no interior das mesmas.

### **2.5.2. Esclerómetro**

Um dos fatores que traduz a qualidade de um betão é a sua dureza. Com o objetivo de avaliar essa dureza, foram desenvolvidos ao longo dos tempos diversos ensaios. Os primeiros registos de tentativas de medir a dureza superficial do betão remontam a 1930, em que os testes se baseavam no impacto causado pelo embate de uma massa ativada por uma determinada energia. Inicialmente eram medidas as dimensões da marca deixada pelo impacto causado por um pêndulo de esfera metálica ou por um martelo metálico, ou ainda pelo disparo de uma pistola de testes normalizada. Mais tarde o engenheiro suíço Ernst Schmidt desenvolveu um aparelho capaz de medir o ressalto provocado pela energia de embate designado por esclerómetro Schmidt (Bungey *et al.*, 2006).

Assim, com o uso de um esclerómetro é possível avaliar a resistência através da dureza superficial de um material. O funcionamento deste baseia-se no método do ressalto, ou seja, é medido o retorno de uma massa conhecida devido à reação causada pelo impacto da mesma contra o material em estudo; quanto maior o retorno, maior a dureza do material (Malanho & Veiga, 2010).

O índice esclerométrico fornece, de uma forma simples, informação relativa à dureza superficial do betão, assim como permite avaliar a uniformidade do betão. Existem no entanto limitações presentes neste ensaio quando se pretende estimar a resistência do betão. Essas

limitações prendem-se com os diversos fatores que influenciam a distância do recuo do martelo, tais como a textura da superfície em ensaio, a rigidez, as dimensões e a forma dos elementos em estudo, a humidade interna e superficial do betão, o tipo de cimento, agregado e molde utilizados, a idade dos elementos, o nível de carbonatação superficial do betão e o próprio atrito interno do aparelho.

Um dos principais objetivos na realização deste ensaio seria efetuar estimativas que relacionassem o índice esclerométrico e a resistência à compressão. Para tal foram desenvolvidos ábacos próprios para cada tipo de aparelho que pretendem, de uma forma simples, relacionar esses dois valores. No entanto, devido às limitações anteriormente referidas, alguns autores constataram a existência de variações no valor da resistência à compressão, que podem variar 18,8% podendo por vezes exceder os 30%, concluindo assim que este ensaio não apresenta resultados satisfatórios que permitam extrapolar o valor da resistência à compressão através do valor do índice esclerométrico. (Malhotra & Carino, 2003).

Existem vários tipos de martelos de ressalto disponíveis, diferenciando entre eles a área e a energia de impacto; a sua escolha é determinada pelo tipo de material em estudo (e pela disponibilidade do equipamento). No Quadro 2.2 encontram-se alguns dos tipos de esclerómetro disponíveis:

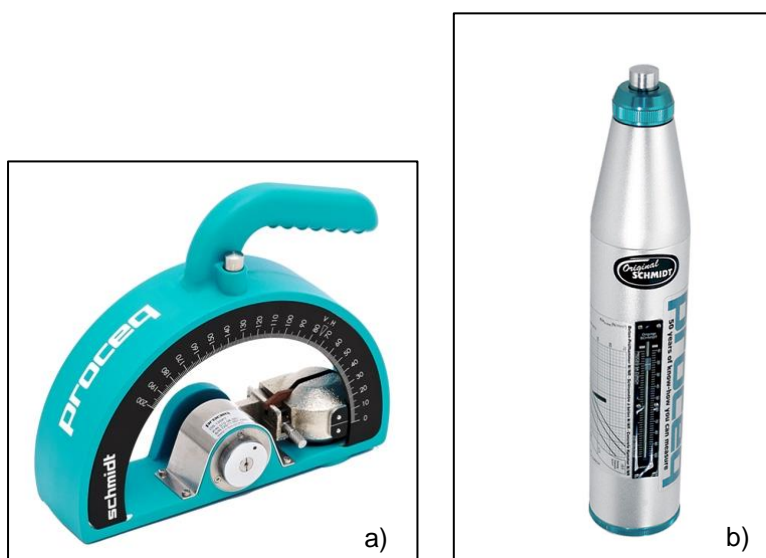


Fig. 2.3 – Esclerómetro de Schmidt pendular (a); Esclerómetro de Schmidt (b)

Quadro 2.2 – Tipos de esclerómetro, energia de impacto e tipo de aplicações  
(Nepomuceno, 1999)

Tipo	Energia de Impacto [N.m]	Tipo de aplicação
N	2,207	Betões em construções correntes de edifícios e pontes
NR	2,207	Aplicação igual ao do tipo N, mas com acessório especial de registo
L	0,735	Elementos de betão de tamanho reduzido ou sensíveis ao impacto e ensaio em pedras artificiais
LR	0,735	Aplicação igual ao do tipo L, mas com acessório especial de registo
LB	0,735	Controle contínuo de qualidade de produtos cerâmicos
M	29,43	Pavimentos em betão de estradas e de pistas de aviação
P	0,883	Materiais de baixa dureza e resistência como materiais de construção leve
PT	0,883	Materiais de construção com resistências extremamente baixas à compressão

### 2.5.3. Resistências mecânicas

As resistências mecânicas de um betão são das propriedades mais importantes a analisar quando se procede à sua caracterização, tendo sido alvo dos mais diversos estudos ao longo dos anos, com o intuito de definir e criar ensaios próprios que permitam a sua determinação. Por isso, a determinação da resistência mecânica do betão passou a ser a propriedade do betão mais testada ao longo dos tempos. Tal prende-se principalmente com três razões: com o facto de esta nos dar informação direta sobre a capacidade resistente de uma estrutura quando é sujeita a cargas de diferentes naturezas, com o facto de os ensaios serem relativamente simples de conduzir e finalmente por estes permitirem avaliar outras propriedades do betão, cuja determinação implicaria ensaios mais complexos. No entanto, a resistência mecânica do betão não é uma propriedade passível de ser determinada empiricamente, existindo diversos fatores que lhe conferem oscilações (Klieger & Lamond, 1994).

Assim, a resistência de um betão é-lhe conferida pelas características do cimento, dos agregados, pelas proporções de mistura, incluindo a relação água/cimento, as condições de cura e a idade. Para o mesmo tipo de cimento, é possível obter diferentes valores de resistências mecânicas de betões, utilizando agregados que apresentem diferentes formas, texturas, composições mineralógicas e resistências. Devido às limitações da relação água/cimento o agregado desempenha um papel mais importante no que às resistências mecânicas diz respeito (Yilmaz & Tugrul, 2012).

Na norma NP EN 206-1:2007 (IPQ, 2007) são apresentadas diversas classificações atribuídas ao betão, incluindo a classificação tendo em conta a sua resistência à compressão. No Quadro 2.3 são apresentados os valores de resistência à compressão das diferentes classes de betão correspondentes a provetes cilíndricos e cúbicos.

Quadro 2.3 – Classe de resistência à compressão de betões (IPQ, 2007)

Classe de resistência à compressão	Resistência característica mínima em cilindros $F_{ck,cyl}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Resistência característica mínima em cubos $F_{ck,cube}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60
C55/67	55	67
C60/75	60	75
C70/85	70	85
C80/95	80	95
C90/105	90	105
C100/115	100	115

Para classificar o betão desta forma é necessário realizar ensaios a amostras de betão com as quais são produzidos provetes normalizados, cilindros com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura e cubos com 150 mm de aresta, que são ensaiados aos 28 dias.

#### 2.5.4. Abrasão

A durabilidade dos materiais construtivos pode ser aferida através da resistência à deterioração causada pelo uso e pela sua exposição. A durabilidade poderá ser avaliada quanto à sua capacidade dos materiais ou elementos construtivos, resistirem ao desgaste físico. A maior causa de perda das características dos materiais com terra é a erosão física e devida à ação da água (Heathcote, 2002).

Para estudar a erosão física e devido à ação da água é possível realizar ensaios em laboratório que simulem esta ação. Para tal recorre-se a ensaios de abrasão com escova, para simular o desgaste físico, e a testes de aspersão de água, a fim de estudar os danos causados pela água da chuva batida a vento.

No caso dos ensaios de abrasão com escova foram analisadas duas hipóteses: o ensaio segundo a norma ASTM D559 (1996) e o procedimento de ensaio apresentado pelo CRATerre (AAVV, 2000).

O ensaio segundo a norma ASTM D559 (1996) foi desenvolvido no final da Segunda Guerra Mundial com o intuito de determinar a quantidade mínima de cimento necessária para ser atingida a rigidez suficiente para resistência a intempéries. Este ensaio é realizado em amostras de solo-cimento curadas em ambiente com uma elevada percentagem de humidade relativa durante 7 dias,

após a compactação, e posteriormente submersas em água durante 5 horas. Após a submersão, as amostras são colocadas em estufa a 71°C de temperatura durante 48 horas. Seguidamente, as amostras são afagadas duas vezes com uma escova de abrasão metálica em toda a sua superfície com uma pressão de 13 Newtons. Finalmente, as amostras são sujeitas a 12 ciclos de molhagem e secagem, pesando as amostras no final dos ciclos, a fim de determinar a percentagem de massa perdida (ASTM, 1996; Heathcote, 2002).

O ensaio desenvolvido pelo CRATerre (AAVV, 2000) propõe estudar a capacidade resistente de BTC à abrasão com escova, ensaio que será incluído numa norma que se encontra em fase de desenvolvimento. Trata-se de uma adaptação do ensaio da norma ASTM D559 (1996), em que não são realizados ciclos de molhagem e secagem. Neste ensaio de abrasão seca é utilizada uma escova de abrasão com carregamento de 3 kg, que é passada na mesma zona para trás e para frente durante 60 segundos, completando um ciclo por segundo. Após terminado o ensaio, o BTC é pesado, determinando a massa perdida, e é medida a área de abrasão, permitindo assim determinar o coeficiente de abrasão do material.

Para os ensaios de erosão por via húmida foram analisados ensaios segundo o Bulletin 5 Spray Test (Middleton, 1987), e o ensaio proposto por Reddy e Jagadish (citado por Heathcote, 2002).

O ensaio proposto pelo Bulletin 5 (Middleton, 1987), consiste em determinar a resistência à erosão de blocos de terra. Para tal, os blocos são sujeitos durante 60 minutos à ação de aspersão de água ou até a água erodir na totalidade o bloco. Medindo a profundidade da erosão é possível determinar o fator de erosão em mm/h. O ensaio utiliza uma ponta de dispersão, um manómetro de pressão e uma proteção com um orifício com um diâmetro entre os 70 e 150 mm. A ponta de dispersão de água é colocada a 470 mm do bloco em estudo, ficando a área de impacto da água restringida pela proteção com o orifício, com uma pressão de 50 kPa. O “The Australian Earth Building Handbook” (Walker & Standards Australia, 2002), que remete para o ensaio proposto pelo Bulletin 5, recomenda como resultados limite para materiais de terra não estabilizados, uma penetração máxima de 60mm por hora e de 15mm por hora para construções localizadas em zonas de risco de ocorrência de ciclones.

O ensaio de Reddy e Jagadish (citado por Heathcote, 2002), propõe que, através do uso de uma ponta de chuveiro com 90 mm de diâmetro e cerca de 226 orifícios com 1,15 mm de diâmetro, a uma pressão de 70kPa, colocada a 175 mm de distância do bloco de terra comprimida em estudo, se determine a taxa de erosão. Os autores referem que 1 minuto de ensaio equivale a uma precipitação de 566 mm, determinando-se uma taxa de erosão através do quociente entre a profundidade média medida por minuto, em milímetros, e 566 mm. Num estudo feito em laboratório pelos autores, foi estudada a erosão de uma amostra que apresentou uma taxa de 22 mm durante 1 minuto de ensaio. Posteriormente, foi construída uma parede de adobe com o mesmo material, que ficou em exposição natural durante 3 anos, apresentando no final 28,3 mm de taxa de erosão. Os autores explicaram esta diferença com o facto de, em laboratório, a taxa de precipitação ser centenas de vezes superior à verificada nos períodos de maior precipitação de água e que mais de metade da precipitação que ocorre é de baixa intensidade, não causando, praticamente, qualquer erosão. Definem então o ensaio

como sendo conservador em relação ao comportamento de paredes de adobe , servindo apenas para o estudo da ação de precipitação mais severa.

### **2.5.5. Resistência ao ataque de sais solúveis**

Até meados dos anos 70 do século passado, a durabilidade do betão não aparentava ser motivo de preocupação para a comunidade em geral, pois nesta altura o uso deste material era relativamente recente e contava-se com a sua longa durabilidade. No entanto, este assunto começou a ser alvo de atenção por parte dos investigadores nos anos 80, após a massificação da construção em betão. Esta preocupação levou ao aumento de estudos relacionados com a durabilidade das estruturas e à criação de classificações baseadas no tipo de exposição a que o betão se encontrava sujeito. Com base nessa exposição, determinava-se qual o tipo de betão a utilizar, assim como as resistências mecânicas desejadas, a fim de minimizar a propensão para danos causados pelas condições de exposição (QLC, 1999). Na norma NP EN 206-1:2007 (IPQ, 2007) são apresentadas as seis classes principais de exposição para estruturas que se encontrem sujeitas a: nenhum risco de corrosão ou ataque; corrosão introduzida por carbonatação; corrosão induzida por cloretos; corrosão induzida por cloretos presentes na água do mar; ataque gelo/degelo; ataque químico.

De acordo com Faria (2004) a contaminação e o ataque por sais é dos fenómenos mais frequentemente responsáveis pela deterioração dos materiais.

Apesar de o betão apresentar um comportamento satisfatório quando exposto a diferentes variações de ambiente, existem no entanto ambientes mais agressivos que diminuem significativamente a durabilidade do betão, obrigando assim a cuidados especiais de forma a prevenir e a aumentar a sua longevidade. Na realidade o betão raramente se encontra exposto a ataques de sais no seu estado sólido. Encontra-se sim exposto à presença destes sais em solução aquosa. Este é o caso do ataque por sulfatos que podem, por vezes, ser encontrados no solo ou ainda dissolvidos na água presente no subsolo. Esses sais são transportados para o interior da estrutura através da sua rede porosa. Uma vez dentro da estrutura estes reagem com os componentes do cimento e, posteriormente, devido à evaporação de água e consequente diminuição da humidade relativa, esses sais tendem a depositar-se e a cristalizar no seu interior e à superfície, aumentando de volume e criando tensões dentro do betão, iniciando assim o processo de degradação da estrutura, inicialmente através do aparecimento de fissuras no material, podendo evoluir até à sua desintegração (ACI Committee 201, 2008).

### **2.5.6. Absorção de água por capilaridade**

Desde sempre que um dos inconvenientes da construção com terra é o seu desempenho quando é sujeita ao contacto com água. Os principais problemas verificados são a fendilhação por contração do material, erosão superficial e a deterioração das resistências mecânicas das construções com terra. No entanto, com vista a melhorar o comportamento deste material, têm sido estudados materiais construtivos com terra com recurso a estabilizadores, como já foi anteriormente referido. De acordo com Houben e Guillaud (1994), quando é utilizada terra na construção esta não

deverá apresentar grandes aglomerados e a superfície de contacto com a água deverá ser suficientemente lisa de forma a minimizar a absorção da mesma.

Existem diversos ensaios que têm como objetivo simular o processo de absorção de água dos materiais, avaliando assim o seu comportamento. No entanto, a tentativa de recriar condições de exposição climática em laboratório é algo complicado, pois na realidade os materiais encontram-se permanentemente sujeitos a alterações de temperatura, humidade, eventualmente intensidade da chuva, força do vento e à ação do sol (Guettal *et al.*, 2005).

Entre os ensaios existentes para avaliar a absorção de água de um material encontram-se a absorção de água por capilaridade e a absorção de água sob baixa pressão, recorrendo à utilização de tubos de Karsten.

*“A capilaridade traduz a capacidade do material saturar-se em água por forças de sucção.”* (Faria, 2004). De acordo com Rato (2006) a absorção inicial de água é feita por capilaridade, podendo esta ocorrer isoladamente ou em conjunto com a ação do vento em situações de chuva. A ascensão de água por capilaridade encontra-se intimamente ligada à estrutura porosa de um material. Todos os materiais apresentam uma determinada estrutura porosa, com poros de maior ou menor dimensão. Quando um material é colocado em contacto com a água os seus poros superficiais ficam cobertos e, obedecendo ao equilíbrio hidrostático, a água é absorvida por estes até atingir o equilíbrio. Dependendo da dimensão dos poros, essa ascensão poderá ser maior ou menor em altura, sendo que, em poros de menores dimensões, a água tende a atingir alturas mais elevadas. Assim, no caso de análise de provetes de pequenas dimensões é possível obter a sua saturação através da ascensão de água por capilaridade. Desta forma, através do estudo da saturação de um material em função do tempo, torna-se possível avaliar um material quanto à sua capacidade de absorção de água, sendo que preferencialmente é desejável que este apresente uma absorção lenta, de forma a minimizar a sua degradação.

#### **2.5.7. Absorção de água sob baixa pressão através da utilização de tubos de Karsten**

Nas últimas décadas os ensaios recorrendo à utilização de tubos de Karsten têm vindo a ser cada vez mais utilizados, com o objetivo de simular a absorção de água da chuva através da microestrutura porosa da superfície das paredes em contacto com o exterior. Este método de ensaio deve o seu nome ao investigador Rudolf Karsten, que descreveu o ensaio numa publicação da sua autoria em 1963. Graças a publicações como o RILEM (1980a), que praticamente criou uma standardização para este método de ensaio, este tem-se tornado um dos principais métodos para avaliação da quantidade de água absorvida pelos poros de elementos de fachada, assim como para quantificar a durabilidade de alguns tratamentos com produtos repelentes de água (Hendrickx, 2012).

Por ser um ensaio não destrutivo, que pode ser realizado in-situ, o ensaio de absorção de água sob baixa pressão utiliza tubos de Karsten, como os apresentados na Figura 2.4, em que o tubo da direita é utilizado para ensaios sobre superfícies horizontais e os restantes para superfícies verticais. Este é um ensaio simples de realizar e que fornece informação sobre o volume de água absorvido numa determinada área durante um período de tempo definido. Esta propriedade deverá ser analisada numa zona não fissurada do material, permitindo relacionar a ação combinada de

chuva acompanhada de rajadas de vento na ordem dos 142,6 km/h (Flores-Colen, 2009; RILEM, 1980a).

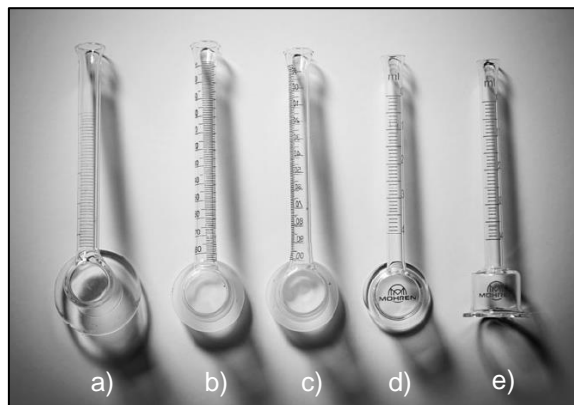


Fig. 2.4 – Diferentes tipos de tubos de Karsten para paramentos verticais (a) (b) (c) (d) e para paramentos horizontais (e) (Hendrickx, 2012)

#### 2.5.8. Secagem

Paralelamente aos ensaios que determinam a capacidade de absorção de água dos materiais, importa também estudar o comportamento desses mesmos materiais no que diz respeito à sua capacidade de perder a água existente. Preferencialmente seria desejável que um material apresentasse um comportamento em que a menor quantidade possível de água fosse absorvida e que a perdesse o mais rapidamente possível. No entanto, a capacidade de secagem de um material, tal como a sua capacidade de absorção de água, encontra-se intimamente relacionada com a sua estrutura porosa. Após períodos de chuva os materiais tendem a perder a água absorvida através de evaporação, sendo a sua estrutura porosa que controla a capacidade de transportar, reter e expulsar a água.

#### 2.5.9. Condutibilidade térmica

A determinação do comportamento térmico dos materiais de construção ganhou especial importância devido ao aumento do consumo das fontes de energia não renováveis e consequente preocupação com a crise energética, que atinge todo mundo e que poderá esgotar por completo as reservas existentes (ACI Committee 122, 2002).

Como forma de reduzir o consumo de energia nos edifícios procura-se utilizar soluções em que as trocas de calor com o exterior sejam minimizadas, de forma a reduzir ao máximo a utilização de aparelhos de climatização, garantindo, no entanto, condições de conforto independentemente das condições exteriores. Assim, um material que apresente uma condutibilidade térmica inferior contribui para a perda de menor quantidade de energia, sendo essa grandeza quantificada pelo valor de  $\lambda$  [W/(m°C)]. Recorrendo a soluções construtivas em que são utilizados isolantes térmicos, um elemento da envolvente constituído por um material que apresente um valor de condutibilidade



menor, implica a necessidade de uma menor espessura total dos elementos para atingir os objetivos de comportamento térmico para a solução completa.

### 2.5.10. Resultados de outros autores

No artigo de Coroado *et al.* (2010) são apresentados os resultados de ensaios de compressão realizados em adobes recolhidos em edifícios da zona de Aveiro. O ensaio foi realizado em amostras recolhidas nos seguintes edifícios: Casa do Major Pessoa (MP11); Casa do Seixal (CS1); Igreja da Misericórdia (IM3); Parede do Pátio (TM1); Casa Maria Magalhães (LMM3).

Mateus (2005) estudou a resistência à compressão de suportes de taipa recolhidos no Barlavento Algarvio em cinco locais distintos: Porches, Sesmarias, Montes de Cima, Arão e Pincho.

Guettala *et al.* (2006) analisou o comportamento mecânico de BTC utilizando amostras de solo recolhidas na região de Biskra, Sudeste da Argélia, estabilizados com cimento, cal e resina. Os autores realizaram ensaios em amostras estabilizadas com: 5% de cimento (T+5c); 8% de cimento (T+8c); 5% de cimento e 3% cal (T+5c+3l); 8% de cimento e 4% de cal (T+8c+4l); 5% de cimento e 50% de resina (T+5c+50r); 8% de cimento e 50% de resina (T+8c+50r).

Nos Quadros 2.4 e 2.5 são apresentados os valores das diversas publicações acima mencionadas.

Quadro 2.4 – Valores de resistência à compressão por outros autores

Autor/Material	Amostra	R <sub>c</sub> [MPa]
Coroado <i>et al.</i> (2010) Adobes	MP11	0,51
	CS1	0,25
	IM3	-
	TM1	1,44
	LMM3	0,41
Mateus (2005) Taipa	Sesmarias	1,1
	Arão	1,3
	Montes de Cima	0,8
	Pincho	1,3
	Porches	2,7

MP11 – Casa do Major Pessoa; CS1 – Casa do Seixal; IM3 – Igreja da Misericórdia; TM1 – Parede do Pátio;  
LMM3 – Casa Maria Magalhães.

Quadro 2.5 – Valores de resistência à compressão por Guettala *et al.* (2006)

Autor/Material	Amostra	R <sub>c</sub> [MPa]	Autor/Material
Guettala <i>et al.</i> (2006) BTC	T+5c	Seco	15,4
		Húmido	9,0
	T+8c	Seco	18,4
		Húmido	12,7
	T+5c+3l	Seco	17,5
		Húmido	12,3
	T+8c+4l	Seco	21,5
		Húmido	15,6
	T+5c+50r	Seco	17,2
		Húmido	11,5
	T+8c+50r	Seco	19,5
		Húmido	14,0

T+xc – terra com x% de cimento; T+xc+x+l – terra com x% de cimento e x% de cal;

T+xc+xr – terra com x% de cimento e x% de resina.

Faria *et al.* (2012) realizaram um estudo utilizando provetes cúbicos de taipa realizados com terras recolhidas na zona de Serpa, que foram também utilizadas na execução de um parque de muretes de taipa na mesma zona. Os provetes cúbicos, executados em 2001 permaneceram desde essa data em ambiente controlado a 20° C de temperatura e 65% de humidade relativa até 2012. Apresentavam dimensões de 14x14x12,5 [cm], tendo sido realizados recorrendo a cinco misturas distintas: utilizando apenas terra recolhida em Serpa (A); utilizando a mesma terra anteriormente referida, tendo esta sido peneirada e eliminadas as partículas retidas no peneiro com 1 cm de abertura de malha (A sieved); utilizando apenas amostras de solo recolhido na zona de Pias (B); utilizando o solo de Pias estabilizado com 10% de volume de cimento Portland (B+c); utilizando outro solo de Serpa estabilizado com 5% de volume de cal hidráulica e 5% de volume de cimento Portland (D+hl+c). Os autores realizaram ensaios de capilaridade, com base na norma EN 15801 (CEN, 2009), tendo sido iniciado o ensaio de secagem imediatamente após o final do ensaio de capilaridade, que teve uma duração de 6 h. Obtiveram os coeficientes apresentados no Quadro 2.6, cuja determinação será posteriormente analisada.

No estudo de Coroadó *et al.* (2010), mencionado anteriormente, foram também realizados ensaios de capilaridade em adobes, de acordo com a norma EN 15801 (CEN, 2009). Os resultados desses ensaios são traduzidos pelos coeficientes de capilaridade que se encontram reunidos no Quadro 2.7.

Quadro 2.6 – Valores obtidos em provetes de taipa por Faria *et al.* (2012)

Amostra	CC [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )]	VA 6h [kg/m <sup>2</sup> ]	IS [-]
A	6,39	33,1	0,7
A sieved	2,07	19,2	0,9
B	2,30	27,0	0,8
B+c	1,34	27,8	0,9
D+hl+c	1,26	18,6	0,9

A,B – terras distintas; c,hl – adição de cimento ou cal hidráulica

Quadro 2.7 – Valores de coeficiente de capilaridade em adobes por Coroadó *et al.* (2010)

Autor	Amostra	CC [kg/(m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )]
Coroadó <i>et al.</i> (2010)	MP11	9,62
	CS1	3,17
	IM3	8,79
	TM1	3,69
	LMM3	4,43

MP11 – Casa do Major Pessoa; CS1 – Casa do Seixal; IM3 – Igreja da Misericórdia; TM1 – Parede do Pátio; LMM3 – Casa Maria Magalhães.

No estudo apresentado por Bahar *et al.* (2004) foram realizados BTC utilizando areia argilosa recolhida na zona de Tizi-Ouzou, a este de Argel, estabilizada com cimento Portland CEMI 32,5. O cimento foi utilizado em percentagens de 5%, 10% e 15%. Os autores testaram a absorção de água por capilaridade das amostras em estudo, após 7 dias de cura a 20°C de temperatura e 65% de humidade relativa, colocando-as em contacto com uma lâmina de 5 mm de água durante 10 minutos. As mesmas amostras foram sujeitas a um segundo ciclo de imersão aos 14 dias de cura. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 2.8, em percentagem, sem que no artigo seja especificado o procedimento utilizado para o tratamento dos resultados.

Chew (2012) teve como objeto de estudo o comportamento de blocos de terra comprimida, com e sem estabilizador, à ação da água. Para tal, realizou ensaios de absorção de água sob baixa pressão de acordo com ensaio proposto pela RILEM (1980a) em BTC, utilizando solo argiloso recolhido numa fábrica local, que foi partido em pedaços de menores dimensões e posteriormente peneirado, tendo sido retiradas as partículas que ficaram retidas no peneiro com 6 mm de abertura. Foram prensados blocos com 5% de cimento como estabilizador e sem cimento. Como resultado o autor obteve uma velocidade de absorção de água de 0,69 ml/min. para blocos sem estabilizador e de 0,60 ml/min. com 5% de cimento.

Quadro 2.8 – Valores de coeficiente de capilaridade em BTC por Bahar *et al.* (2004)

Autor	Amostra	CC [%]	
		7 dias de cura	14 dias de cura
Bahar <i>et al.</i> (2004)	T+5c	12,67	28,94
	T+10c	11,20	28,94
	T+15c	6,00	11,33

T+xc – terra com x% de cimento

Segundo o ITE 50 (2006), o valor de condutibilidade térmica de um betão normal varia entre os 1,65 e 2,0 W/(m°C), existindo também um valor de referência para betão de terra estabilizada, de 1,1 W/(m°C), sendo este também o valor de referência para o adobe, taipa e BTC.

No estudo realizado por Faria *et al.* (2012), mencionado e explicado anteriormente, foram também realizados ensaios de condutibilidade térmica aos provetes de taipa utilizando o aparelho ISOMET 2104, de medição de transferência de calor com uma sonda de contacto superficial 0,3-2,0 W/mK.

A fim de estudar soluções que apresentassem melhor comportamento térmico, Pereira (2013) analisou provetes de taipa com diferentes tipos de adições. O autor reproduziu provetes de taipa com compactação mecânica em 5 camadas e eliminou a granulometria superior a 2 cm, aos quais adicionou argila expandida e granulado de cortiça em substituição de solo em percentagens de 5, 10, 15 e 20%. Os ensaios foram realizados em provetes cúbicos com arestas de 10 cm e foi utilizada um equipamento igual ao usado por Faria *et al.* (2012).

Quadro 2.9 – Resultados do estudo de condutibilidade térmica de outros autores

Autor/Material	Amostra		$\lambda$ [W/(m°C)]
Faria <i>et al.</i> (2012) Taipa	A		0,64
	A sieved		1,21
	B		0,95
	B+c		0,81
	D+hl+c		1,06
Pereira (2013) Taipa	Argila Expandida	T+0%	1,08
		T+5%	1,04
		T+10%	0,93
		T+15%	0,94
		T+20%	0,79
	Granulado de Cortiça	T+0%	1,08
		T+5%	0,91
		T+10%	0,73
		T+15%	0,66
		T+20%	0,56

A,B – terras distintas; c,hl – adição de cimento ou cal hidráulica

T+x% - Terra com x% de argila expandida ou granulado de cortiça

### 3. CAMPANHA EXPERIMENTAL

A campanha experimental desenvolvida no âmbito deste trabalho tem como principal objetivo a caracterização dos elementos de betão com terra e de betão padrão em estudo; para tal foram realizados ensaios não destrutivos e destrutivos.

Neste capítulo inicialmente é feita uma caracterização dos materiais utilizados, uma descrição da constituição dos betões e da execução das lajetas usadas, assim como são apresentadas as dimensões dos provetes analisados em cada ensaio. Seguidamente são descritos os procedimentos de ensaio adotados e são apresentados e analisados os resultados obtidos.

As misturas de betão com terra, assim como a execução das lajetas utilizadas nesta campanha experimental, ficaram a cargo da empresa ESLAM, tendo estas sido realizadas nas suas instalações em Salir do Porto e posteriormente condicionadas a temperatura e humidade controladas no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

#### 3.1. Provetes

##### 3.1.1. Terra utilizada

A terra utilizada nas lajetas analisadas nesta campanha experimental foi recolhida numa obra na Foz do Arelho, concelho das Caldas da Rainha, distrito de Leiria. Parte da terra recolhida foi destinada a análises de identificação e a restante utilizada na execução de um conjunto de provetes em forma de lajetas e cilindros.

Quando é utilizada terra como material de construção torna-se extremamente importante a sua correta caracterização, de forma a otimizar os aspetos inerentes à sua eficiente utilização. Pretende-se com esta caracterização assegurar que a terra utilizada cumpre as exigências construtivas.

Para efetuar a caracterização do solo recolhido prepararam-se amostras seguindo a Especificação de Ensaio E 195 (LNEC, 1966a) do LNEC, de forma a realizar, uma análise granulométrica com base nas Especificações de ensaio E196 (LNEC, 1966b) e E239 (LNEC, 1970) do LNEC, a determinação de limites de consistência de acordo com a NP 143:1969 (IGPAI, 1970), o cálculo da retração linear segundo Gomes *et al.* (2012) e o ensaio de compactação (PROCTOR) seguindo a Especificação de ensaio E 197 (LNEC, 1967). Esta caracterização foi efetuada por Catarina Pereira, no âmbito do trabalho do projeto financiado pelo QREN Parede Ecoestrutural.

Na Figura 3.1 é apresentada a curva granulométrica resultante dos ensaios de caracterização do solo húmido utilizado na execução dos provetes de betão com terra.

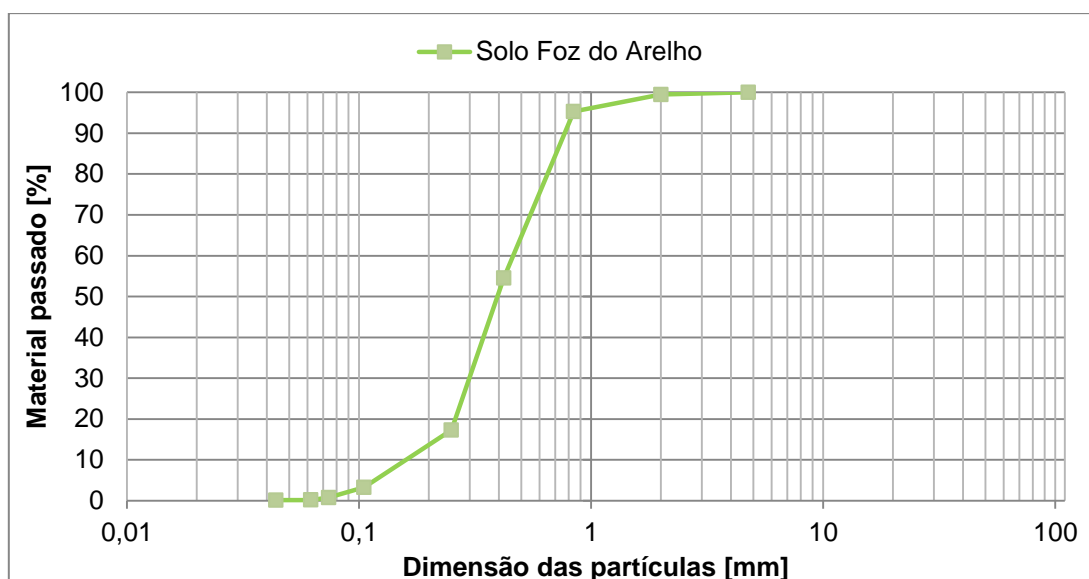


Fig. 3.1 – Curva granulométrica do solo utilizado nos betões

Analisando a curva granulométrica verifica-se que grande parte das partículas presentes neste solo se encontram entre os 0,25 e os 0,85 mm. Utilizando o sistema de classificação unificada de solos (ASTM, D2487-11 - Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system), 2011), desenvolvida por Arthur Casagrande, e com base na curva granulométrica, este solo é classificado como sendo uma areia mal graduada (SP).

Em relação aos ensaios de limites de consistência e de retração linear, não foi possível obter resultados nestes ensaios devido à elevada percentagem de areia no solo e à fraca presença de argila.

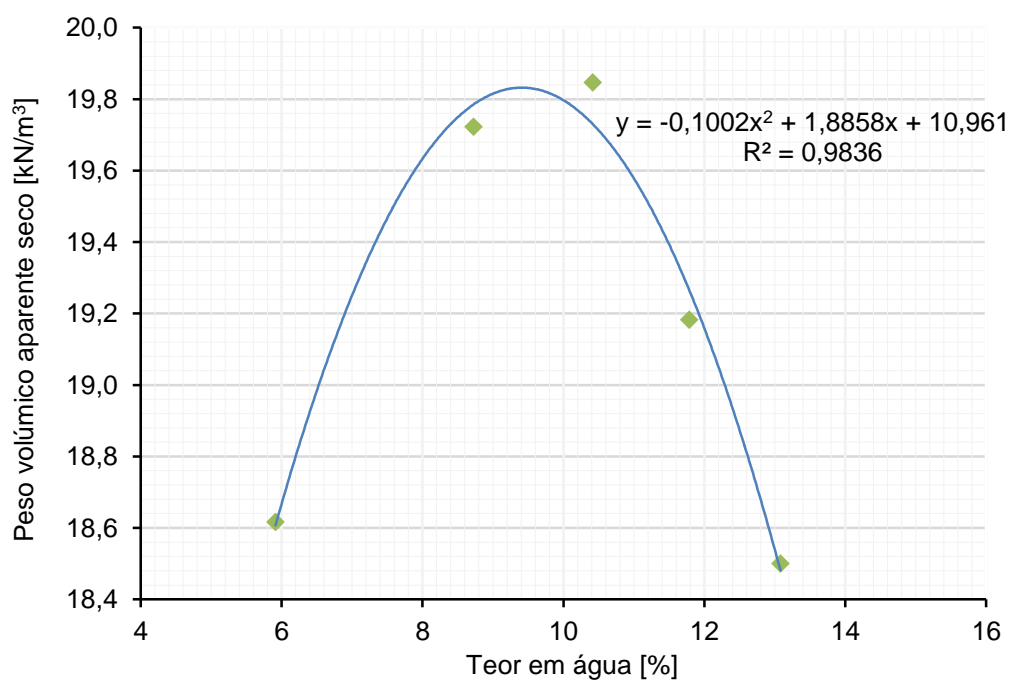


Fig. 3.2 – Curva de compactação (PROCTOR)

Na Figura 3.2 é apresentada a curva resultante do ensaio de compactação (PROCTOR). Este ensaio pretende determinar o valor ótimo de teor em água que conduz a valores de compacidade e de resistência máximas. Através da derivação da equação da parábola que define a curva de compactação é possível calcular esse valor ótimo, que no caso do solo estudado corresponde a um teor de água de 9,41% e a um peso volúmico seco máximo de 19,83 kN/m<sup>3</sup>.

### 3.1.2. Composições dos betões

No Quadro 3.1 encontram-se indicadas as datas de produção dos provetes, assim como as suas quantidades. São também apresentadas as denominações adotadas de forma a distinguir as diferentes misturas e as suas diferentes características.

Quadro 3.1 – Designação, dimensão e data de produção dos betões (provetes e dados fornecidos pela empresa ESLAM)

Mistura de Betão	Data de produção	Lajeta 50x30x5 [cm]	Cilindro $\Phi$ 15 cm e h=30 cm
A	21-11-2011	3 unidades	3 unidades
B	22-11-2011	3 unidades	3 unidades
C	23-11-2011	3 unidades	3 unidades
P	22-08-2012	3 un. com malha metálica interior (Pa)	3 unidades
	data não definida	2 un.(40x40x8 [cm])	

As misturas A, B e C são betões constituídos por cimento, solo e brita; já a mistura P trata-se de um betão de referência, de agregados “normais”, correntemente utilizado pela empresa ESLAM. Para a execução dos betões utilizou-se um cimento CEM II/B-L 32,5 N, uma brita nº1 de origem calcária e o solo recolhido na Foz do Arelho. No Quadro 3.2 é apresentada a composição ponderal de cada um dos betões.

Quadro 3.2 – Composição ponderal dos betões (Faria *et al.*, 2013)

Betão	Cimento:Solo:Brita	Cimento:Agregado (solo+brita)	Brita:Solo	Relação A/C
A	1:3:1	1:4	1:3	0,6
B	1:3:2	1:5	1:1,5	0,6
C	1:6:4	1:10	1:1,5	0,75
P	1:2:2 [ci:areia:brita]	1:4 [ci:ag.(areia+brita)]	-	0,75

Fazendo uma análise comparativa dos valores presentes no Quadro 3.2 é de salientar o facto da composição A ser a única que apresenta um traço cimento:agregado comparável ao do betão padrão correntemente utilizado pela empresa; entre as composições de betão com terra, a composição A é das três a que apresenta um traço em ligante mais forte, sendo o traço da composição B ligeiramente mais fraco e o da composição C bastante mais fraco; ambas as composições B e C apresentam a mesma proporção entre solo e brita como agregado, sendo a proporção de solo no agregado metade do valor presente na composição A.

### **3.1.3. Execução e cura das lajetas**

Com cada uma das misturas de betão com terra mencionadas no capítulo 3.1.2 foram efetuadas três lajetas com formato paralelepípedo de dimensões 50x30x5 [cm], assim como foram realizadas três lajetas de betão padrão armado com estas mesmas dimensões e mais duas lajetas de dimensões 40x40x8 [cm]. Importa referir o facto de os operários terem mencionado sentir maior dificuldade na betonagem dos provetes da composição C comparativamente às restantes misturas A, B e P. Após a betonagem das lajetas de betão com terra, estas permaneceram em cura durante 10 meses em ambiente controlado com humidade relativa de  $70\pm 5\%$  e com temperatura de  $20\pm 3^\circ\text{C}$  até ao início dos ensaios.

### **3.1.4. Ensaios e cortes efetuados nas lajetas**

As lajetas inicialmente, como já foi referido, apresentavam um formato paralelepípedo de dimensões 50x30x5 [cm]. Sob este formato foram utilizadas para realização dos ensaios de condutibilidade térmica, ultrassons e com esclerómetro pendular. Em relação às lajetas de betão padrão P foram também realizados estes mesmos ensaios; no entanto, no que diz respeito ao formato das lajetas importa referir que existiam três lajetas de betão padrão armado com as mesmas dimensões das lajetas de betão com terra e duas lajetas com uma pega metálica com dimensões 40x40x8 [cm]. Como se considerou que a presença de armadura no interior das lajetas podia influenciar diretamente os resultados dos ensaios de ultrassons, inviabilizando assim a comparação dos seus resultados com os valores obtidos nos mesmos ensaios nas composições com terra, optou-se então por efetuar um corte na diagonal nas duas lajetas de betão que possuíam a pega metálica, ficando assim com quatro metades, de forma a eliminar qualquer tipo de armadura e garantindo apenas o estudo do betão. As três lajetas restantes de betão P possuíam uma malha soldada como armadura interior, por esse facto foram utilizadas apenas no ensaio de condutibilidade térmica com o intuito de verificar a influência desta ao nível do comportamento térmico.

Após a realização dos ensaios nas lajetas com o seu formato original determinaram-se as dimensões dos provetes necessárias à realização do maior número de ensaios, optando-se por cortar as lajetas de forma a criar seis provetes de dimensões 5x5x10 [cm], três provetes de dimensões 5x5x15 [cm] e deixando cerca de metade da lajeta inteira.

Durante o corte das lajetas em provetes de menores dimensões, observou-se que alguns destes provetes quebravam devido à presença de um elevado número de aglomerados de terra de



grandes dimensões, como se pode observar na Figura 3.3 b), o que é sinónimo de uma deficiente homogeneização da terra com os restantes constituintes dos betões.

Após efetuar o corte com máquina de corte Jumbo e com auxílio de uma rebarbadora (Figura 3.3), utilizaram-se as meias lajetas nos ensaios de absorção de água sob baixa pressão, abrasão por via seca e abrasão por via húmida. Com os provetes de dimensões 5x5x15 [cm] foram realizados ensaios de resistência à tração por flexão, de onde resultaram duas metades; com uma das metades realizou-se o ensaio de resistência ao ataque de sulfatos e, com a outra metade, o ensaio de resistência à compressão; com os pedaços resultantes da fratura dos provetes por compressão realizou-se o ensaio que permite a determinação da porosidade aberta das amostras. Os provetes de dimensões 5x5x10 [cm] foram utilizados na realização dos ensaios de capilaridade e secagem, sendo analisadas ambas as superfícies dos provetes (lisa e rugosa) com três provetes por superfície. Após terminado o ensaio de secagem, com os provetes estabilizados, estes foram ensaiados à compressão de forma a inferir se o contacto com a água traduzia alterações significativas na resistência à compressão nos betões em estudo. A Figura 3.4 apresenta o esquema que traduz os ensaios realizados nos provetes, a forma dos respetivos provetes e a sua ordem de execução.



Fig. 3.3 – Corte de lajeta com máquina Jumbo (a); Presença de grandes aglomerados de terra no provete (b); Corte dos provetes com rebarbadora (c);

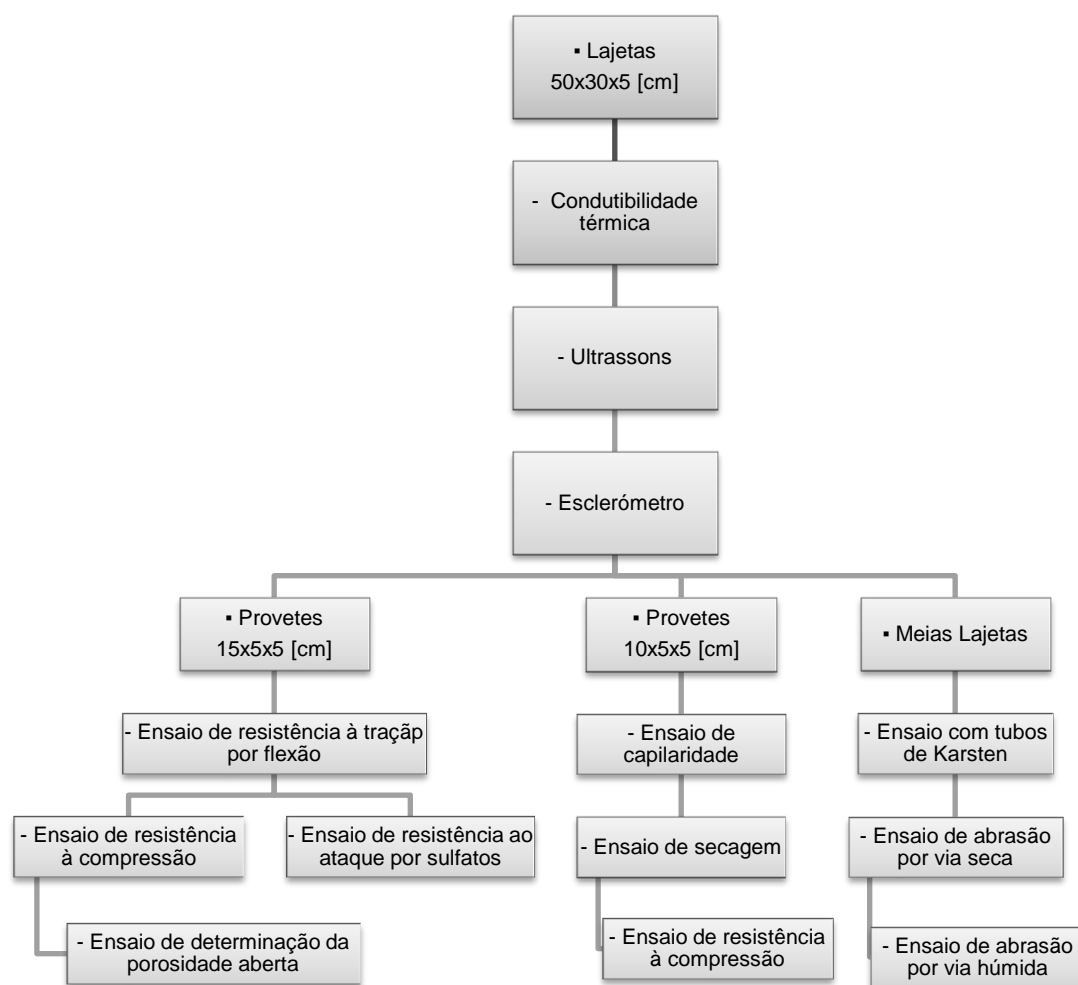


Fig. 3.4 – Sequência esquemática dos ensaios realizados nos provetes

### 3.2. Condutibilidade térmica

O ensaio de condutibilidade térmica tem como objetivo a determinação da grandeza  $\lambda$  [W/(m.K)], que traduz a facilidade com que um material conduz energia sob a forma de calor.

Para a realização deste ensaio foram utilizadas as lajetas completas após terem permanecido no mínimo 48 horas expostas a uma humidade relativa constante de  $65\pm 5\%$  e a  $20\pm 2^\circ\text{C}$  de temperatura, que se considerou suficiente para atingir o equilíbrio com o ambiente. Foi analisada a face lisa das lajetas, pois esta face permite que a sonda permaneça completamente em contacto com o material, de forma a obter leituras corretas. O ensaio foi realizado aos 9 meses e meio de idade, seguindo as indicações do manual de instruções do aparelho, em laboratório a  $21^\circ\text{C}$  de temperatura e humidade relativa de 60%, para onde as lajetas foram transportadas individualmente; após o término do ensaio foram colocadas novamente em sala condicionada.

- **Material**

- ISOMET 2104 com sonda de contacto superficial de 0,3-2,3 [W/(m.K)];
- Placa de XPS com 3 cm de espessura.

- **Procedimento experimental**

- Marcaram-se 6 pontos de leitura dispersos na lajeta de modo a analisar zonas distintas de material, garantindo sempre uma distância mínima de 5 cm do bordo da lajeta;
- Colocou-se a lajeta sobre a placa de XPS;
- Colocou-se a sonda sobre o ponto a ensaiar e seleccionou-se a opção de ensaio de condutibilidade térmica no aparelho;
- Registou-se o valor determinado pelo aparelho de ensaio;
- Repetiu-se novamente o procedimento de leitura para os restantes pontos;
- Após a leitura dos 6 pontos inicialmente definidos, calculou-se o valor de média e respetivo desvio padrão de cada lajeta.



Fig. 3.5 – Ensaio de condutibilidade térmica

**Resultados obtidos no ensaio:**

No Quadro 3.3 encontram-se os valores médios e respetivos desvios-padrão obtidos nos ensaios de condutibilidade térmica efetuados nos betões com terra, assim como ao betão padrão em provetes com e sem armadura. Importa novamente salientar que o ensaio apenas se realizou sobre a superfície lisa pois esta permite o contacto total da sonda com a superfície, contrariamente ao que aconteceria na face rugosa.

A resistência térmica varia de forma inversa com a condutibilidade térmica, ou seja, quanto menor a condutibilidade térmica, maior a resistência térmica do material, contribuindo assim para o isolamento térmico da solução.

Quadro 3.3 – Valores médios e desvios-padrão da condutibilidade térmica

Betão	$\lambda$ [W/m.°C]	
	Med.	d.p.
A	1,32	0,08
B	1,43	0,08
C	1,14	0,07
P	2,10	0,10
Pa	2,07	0,05

Através da análise da Figura 3.6 é possível observar que o betão C é o que apresenta um valor mais baixo de condutibilidade térmica, enquanto os betões padrão apresentam um valor mais elevado de condutibilidade térmica, não havendo porém diferenças significativas entre o betão padrão sem armadura (P) e o betão padrão com armadura (Pa).

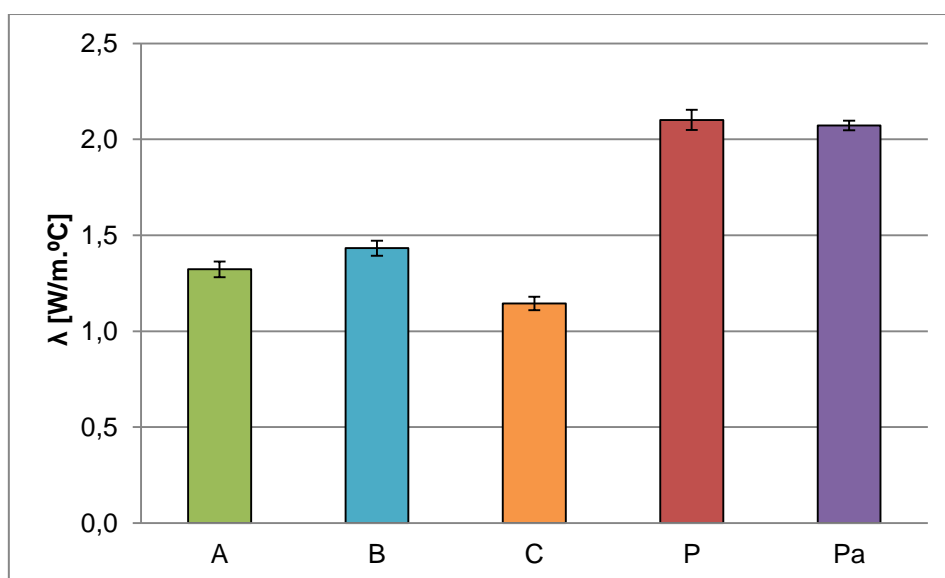


Fig. 3.6 – Condutibilidade térmica dos betões

### 3.3. Módulo de elasticidade dinâmico- Ultrassons

A realização de ensaios de ultrassons permite avaliar a homogeneidade do material, assim como a deteção de imperfeições pois, caso estas existam, haverá um incremento ou diminuição na velocidade de propagação da onda.

O processo utilizado neste ensaio teve como base a norma EN 12504-4 (CEN, 2004) e tem como princípio a medição do tempo de propagação de ondas ultrassónicas, através do material em estudo, entre dois pontos onde são colocados o transmissor e o recetor do aparelho. Conhecendo a distância entre os pontos consegue-se determinar a velocidade de propagação das ondas, tornando assim possível o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico.

Para este ensaio foram realizadas leituras diretas (com o transmissor e o recetor colocados em faces opostas), assim como leituras indiretas (com ambos colocados na mesma face), cruzando o máximo número possível de pontos de modo a obter o máximo de informação. Foram utilizadas mais uma vez as lajetas completas, garantindo que estas permaneciam no mínimo 48 horas expostas a uma humidade relativa constante de  $65\pm 5\%$  e a  $20\pm 2^\circ\text{C}$  de temperatura. O ensaio foi realizado aos 9 meses e meio de idade, em laboratório a  $21^\circ\text{C}$  de temperatura e humidade relativa de 60%, para onde as lajetas foram transportadas individualmente, e após terminado o ensaio estas foram colocadas novamente em sala condicionada.

- **Material**

- Aparelho de ultrassons Pundit Lab da marca PROCEQ;
- Gel condutor;
- Balança de precisão 0,1g.

- **Procedimento experimental**

- Mediram-se e pesaram-se as lajetas;
- Marcaram-se 6 pontos na face superior (lisa) da lajeta - distando 5 cm das extremidades e 20 cm entre si -, 3 pontos a meia altura nas faces laterais maiores - distando 5 cm das extremidades e 20 cm entre si (no alinhamento da face superior) - e 3 pontos a meia altura nas faces laterais menores - distando 5 cm das extremidades e 10 cm entre si;
- Efetuaram-se medições entre os pontos da face superior (propagação indireta) aplicando gel condutor nos pontos de leitura e colocando num ponto o transmissor e no outro o recetor, cruzando todos os pontos e efetuado três medições por cada par de pontos;
- Efetuou-se o mesmo procedimento nas faces laterais maiores e menores (propagação direta).
- Calculou-se o módulo de elasticidade dinâmico através da Equação 3.1 (BSI, 1986):

$$E_d = V^2 \times M_{ap} \times \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$

(Eq. 3.1)

Onde:

$E_d$  – módulo de elasticidade dinâmico [MPa]

$V$  – velocidade de propagação das ondas ultrassónicas [km/s]

$M_{ap}$  – massa volúmica aparente do provete [ $\text{kg/m}^3$ ]

$\nu$  – coeficiente de Poisson

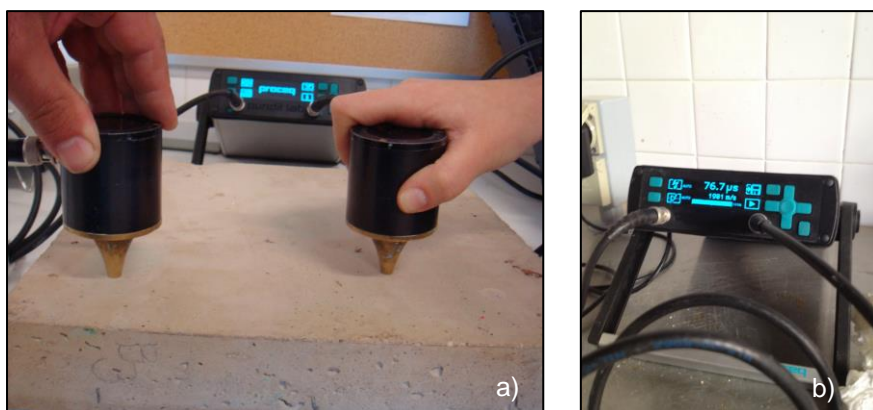


Fig. 3.7 – Ensaio de ultrassons(a); Aparelho de leitura (b)

Para a determinação da malha explicitada foram inicialmente efetuadas medições obedecendo a uma malha composta por 10 pontos na face superior - distando 10 cm entre si e 5 cm das extremidades -, 5 pontos a meia altura em cada uma das faces laterais maiores - distando 5 cm das extremidades e 10 cm entre si - e 3 pontos a meia altura nas faces laterais menores, distando 5 cm das extremidades e 10 cm entre si; como os resultados obtidos foram bastante conformes e pouco díspares, traduzindo um desvio padrão inferior a 10%, optou-se então pela duplicação da distância entre pontos nas faces superior e laterais maiores.

#### Resultados obtidos no ensaio:

No Quadro 3.4 são apresentados os valores médios e respetivos desvios padrão da velocidade de propagação de ondas ultrassónicas registados nos diferentes betões. A velocidade de propagação das ondas ultrassónicas permite avaliar a compacidade de um material, verificando-se uma diminuição de velocidade na presença de vazios.

Quadro 3.4 – Velocidade de propagação dos ultrassons

Betões	$V_{us}$ [m/s]	
	Med	dp
A	2100	587
B	2167	569
C	989	276
P	2890	534

Analisando o Quadro 3.4, o betão padrão (P) é o que apresenta o valor mais elevado de velocidade de propagação de ondas ultrassónicas, não sendo este significativamente superior ao valor verificado nos betões A e B; esta situação pode ser justificada com a presença da terra nos betões A e B que faz com que haja um aumento de vazios nestas. O betão C apresenta um valor bastante inferior aos obtidos nos restantes betões, o que seria expectável pois após o corte das lajetas deste betão verificou-se a presença de aglomerados de terra de grandes dimensões.

No Quadro 3.5 e na Figura 3.8 apresentam-se os valores médios e de desvio padrão do módulo de elasticidade dinâmico obtido através do ensaio de ultrassons. O módulo de elasticidade dinâmico permite avaliar a deformabilidade de um material; a um menor valor de módulo de elasticidade dinâmico corresponderá uma maior deformabilidade.

Para o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico consideram-se valores do coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) de 0,2 e de 0,3. Não tendo sido possível aferir esta característica de forma experimental - algo que será determinado posteriormente através de ensaios mecânicos a provetes cilíndricos, a realizar no âmbito da dissertação de mestrado de Brito (em curso) intitulada “Caracterização de betão com terra através de provetes cilíndricos” – admite-se que os valores deverão situar-se dentro deste intervalo, por serem os valores de referência para o betão utilizado correntemente.

Quadro 3.5 – Valores do módulo de elasticidade dinâmico

Betões	Ed [N/mm <sup>2</sup> ]			
	$\nu=0,2$		$\nu=0,3$	
	Med	dp	Med	dp
A	8074	140	6664	520
B	8725	601	7202	496
C	1795	140	1482	115
P	17661	604	14578	498

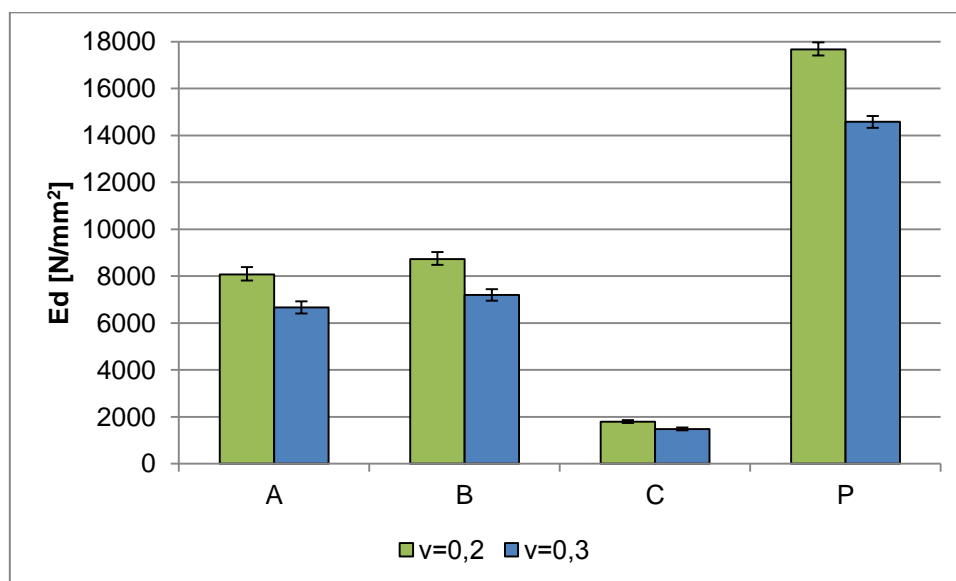


Fig. 3.8 – Valores do módulo de elasticidade dinâmico

Analisando o Quadro 3.5 e a Figura 3.8 observa-se que o valor do módulo de elasticidade dinâmico do betão padrão atinge um valor superior ao dobro do valor mais elevado obtido nos outros betões, sendo o valor obtido nos betões A e B bastante semelhante. Destaca-se também o facto de o valor obtido para o betão C ser substancialmente inferior a qualquer um dos outros betões objeto de estudo, conferindo-lhe assim uma maior deformabilidade.

### 3.4. Resistência e dureza superficial – Esclerómetro

Este ensaio tem como objetivo determinar a dureza superficial de um material através da utilização de um esclerómetro.

Para a realização deste ensaio foram utilizadas as lajetas completas após estas terem permanecido no mínimo 48 horas expostas a uma humidade relativa constante de  $65\pm 5\%$  e a  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$  de temperatura. Foram analisadas ambas as faces dos provetes a fim de determinar as diferenças entre estas. O ensaio, realizado aos 10 meses de idade, teve como base norma EN 12504-2 (CEN, 2001) e seguiu as indicações do manual de instruções do aparelho, realizando-se em ambiente condicionado a temperatura e humidade relativa constantes de  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$  e  $65\pm 5\%$  respetivamente.

Neste ensaio foram utilizados dois tipos de esclerómetro. Inicialmente utilizou-se um esclerómetro pendular do tipo PT da PROCEQ:

- **Material**
  - Esclerómetro pendular PROCEQ PT.
- **Procedimento experimental**
  - Assentou-se a lajeta numa superfície rígida de forma a garantir que a superfície de apoio não absorvia o impacto causado pela massa do esclerómetro;
  - Determinaram-se três pontos a ensaiar por face de lajeta;
  - Colocou-se o esclerómetro encostado na lajeta de forma a fazer coincidir a zona de impacto da massa do esclerómetro com o ponto a ensaiar;
  - Armou-se o esclerómetro e libertou-se o mesmo;
  - Registou-se o valor do ressalto do pêndulo;
  - Repetiu-se o procedimento dez vezes no mesmo ponto.

A marcação dos pontos respeitou a distância mínima de 20 mm entre pontos e estes foram marcados segundo a diagonal da lajeta.

Realizou-se um segundo ensaio com um esclerómetro do tipo N, pois após a utilização do esclerómetro pendular verificou-se que os valores lidos pertenciam a uma gama demasiadamente elevada para análise no ábaco disponível com aparelho.

- **Material**
  - Esclerómetro do tipo N.
- **Procedimento experimental**
  - Assentou-se a lajeta numa superfície rígida de forma a garantir que a superfície de apoio não absorvia o impacto causado pela massa do esclerómetro;
  - Colocou-se o esclerómetro encostado na lajeta de forma a fazer coincidir a zona de impacto da massa do esclerómetro com o ponto a ensaiar;
  - Armou-se o esclerómetro e libertou-se o mesmo;
  - Registou-se o valor do ressalto da massa;



- Repetiu-se o procedimento cinco vezes no mesmo ponto.

Após a realização do ensaio de validação verificou-se que os valores obtidos eram demasiadamente pequenos para efetuar a leitura no ábaco do aparelho.

Conclui-se assim que o esclerómetro a utilizar neste tipo de material deverá ser um esclerómetro do tipo L, esclerómetro que não se encontrava disponível aquando da realização da campanha experimental.



Fig. 3.9 – Ensaio com esclerómetro tipo N (a); Ensaio com esclerómetro do tipo PT (b)(c)

#### **Resultados obtidos no ensaio:**

No Quadro 3.6 encontram-se reunidos os valores médios e respetivos desvios-padrão da dureza superficial (DS) obtidos através dos ensaios realizados com o esclerómetro pendular tipo PT, nos betões com terra e padrão. Os valores apresentados foram obtidos através da média aritmética das diversas leituras, tendo sido descartados todos os valores que diferissem 10 unidades do valor médio e, quando num ponto de leitura o número de pontos rejeitados foi superior a 20% da amostra (3 valores), esse ponto não foi contabilizado para efeitos de média. A norma EN 12504-2 (CEN, 2001) indica este procedimento para a seleção de valores, sendo que nesta são descartados todos os valores que diferirem 6 unidades do valor médio. Este critério foi alargado para as 10 unidades tendo em conta a ordem de grandeza dos valores registados. Foram igualmente consultados trabalhos de outros autores em que também havia registos deste ensaio, não tendo sido encontrada qualquer referência ao critério utilizado para a apresentação de resultados.

Os valores deste ensaio são obtidos por leitura direta do aparelho, que fornece valores na escala de Vickers, a qual classifica a dureza dos materiais, não tendo sido utilizado o ábaco fornecido com o equipamento.

Quadro 3.6 – Valores médios e de desvios-padrão de dureza superficial (DS)

Lajeta	Face Lisa [escala de Vickers]		Face Rugosa [escala de Vickers]	
	Média	d.p.	Média	d.p.
A	106,11	5,13	99,62	10,60
B	102,42	5,60	94,27	9,86
C	36,81	15,07	42,00	9,84
P	130,81	9,25	123,96	12,93

Analisando o Quadro 3.6 verifica-se que a lajeta do betão A é aquela que apresenta valores de dureza superficial mais elevados comparativamente aos outros betões com terra, sendo este valor registado na face lisa. O betão C é aquele que apresenta menores valores de dureza superficial, mas no caso deste betão o valor mais elevado é registado na face rugosa. Comparativamente, os betões com terra apresentam menores valores de dureza superficial em relação ao betão padrão analisado.

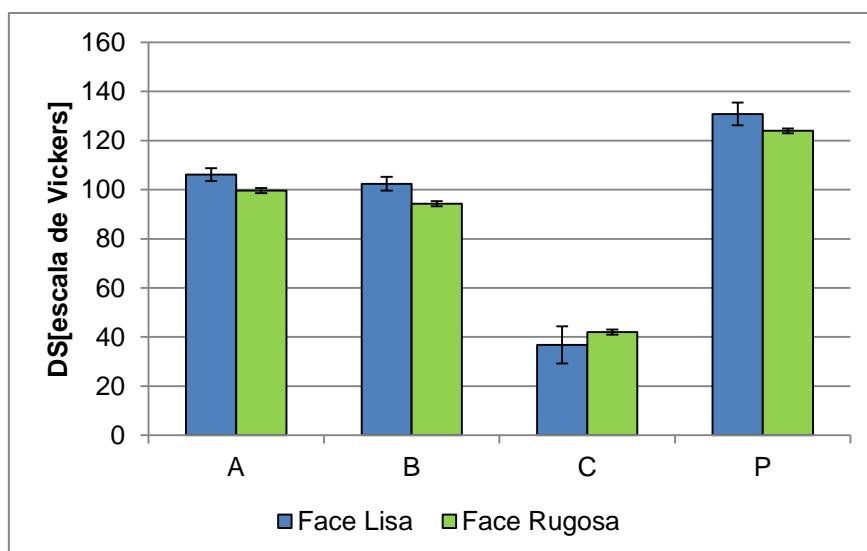


Fig. 3.10 – Valores de dureza superficial (DS)

Observando a Figura 3.10, onde se encontram representados graficamente os resultados obtidos, é possível constatar o elevado valor de desvio-padrão do betão C na face lisa. Como já foi mencionado anteriormente, este ensaio é influenciado por diversos fatores externos, pelo que apenas deverá ser analisado sob o ponto de vista qualitativo, e não quantitativo. A existência de vários valores rejeitados mostra, mais uma vez, que o esclerómetro utilizado, pendular tipo PT, não seria o mais adequado a este tipo de material, em especial para os betões A, B e P. Em relação ao comportamento das lajetas do betão C, durante o ensaio houve rotura parcial de duas delas, o que poderá indicar uma energia de impacto demasiadamente elevada.

### 3.5. Absorção de água sob baixa pressão - Tubos de Karsten

O ensaio de absorção de água sob baixa pressão através da utilização de tubos de Karsten pretende determinar a quantidade de água absorvida por unidade de área de um material poroso durante um período de tempo determinado, permitindo caracterizá-lo quanto à permeabilidade simulada da água da chuva acompanhada por uma pressão devido ao vento correspondente a 961,39 Pa o que equivale a rajadas de vento de 142,6 km/h (RILEM, 1980a).

Este ensaio foi realizado aos 10 meses e meio de idade, nas meias lajetas após o corte e foram analisadas ambas as faces de modo a tentar determinar a existência de uma face que predominantemente mostrava uma menor absorção de água, realizando três ensaios por face em cada lajeta, num total de sessenta e seis medições.

O procedimento de ensaio foi realizado com base no Test N° II 4 do RILEM (RILEM, 1980a).

- **Material**

- Tubos de Karsten verticais devidamente graduados entre 0 e 4 cm<sup>3</sup>;
- Massa de moldar para a fixação dos tubos;
- Cronómetro.

- **Procedimento experimental**

- Colocou-se a lajeta na vertical;
- Fixaram-se três tubos de Karsten verticais com massa de moldar na lajeta dispondo os mesmos na diagonal, e evitando imperfeições do material;
- Encheram-se os tubos até à marca de 0 cm<sup>3</sup> (com 30 segundos de desfasamento entre tubos) e iniciou-se a contagem do tempo;
- Mediu-se a quantidade de água absorvida aos 5, 10, 15, 30 e 60 minutos repondo com água até ao nível 0 cm<sup>3</sup> sempre que era atingida a marca dos 4 cm<sup>3</sup>.

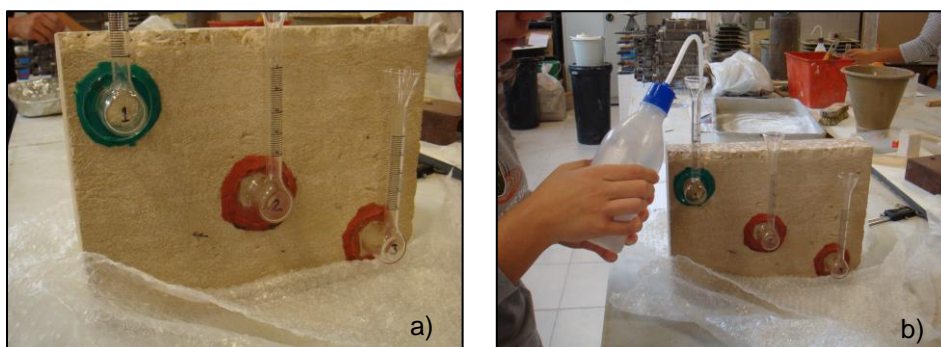


Fig. 3.11 – Aplicação tubos de Karsten (a); Início do ensaio (b);



Fig. 3.12 – Final do ensaio de absorção de água sob baixa pressão

As lajetas antes de serem ensaiadas encontravam-se condicionadas em ambiente controlado a uma humidade relativa constante de  $65\pm 5\%$  e a  $20\pm 2^\circ\text{C}$  de temperatura. O ensaio foi realizado em laboratório a  $21^\circ\text{C}$  de temperatura e humidade relativa de 60%, para onde as lajetas foram transportadas individualmente e, após terminado o ensaio, estas voltaram a ser novamente colocadas em sala condicionada. Importa referir que os ensaios em faces opostas na mesma lajeta realizaram-se com o mínimo de uma semana de diferença, de forma a garantir que água presente na lajeta proveniente do primeiro ensaio não interferia com os resultados da outra face.

#### Resultados obtidos no ensaio:

No Quadro 3.7 encontram-se as médias de água absorvida por área de contacto pelos betões estudados, tanto na face lisa como na face rugosa, aos 5, 10, 15, 30 e 60 minutos de ensaio e na Figura 3.13 são apresentadas as curvas dessa absorção em função da raiz do tempo.

Quadro 3.7 – Evolução da quantidade de água absorvida em ambas as faces

		Água absorvida [ $\text{kg/m}^2$ ]							
		A		B		C		P	
	t [min]	Med	dp	Med	dp	Méd	dp	Méd	dp
	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Rugosa	5	2,20	0,59	1,69	0,72	2,80	0,40	1,73	0,35
	10	3,52	0,94	2,66	1,16	4,52	0,80	2,67	0,48
	15	4,61	1,22	3,59	1,45	6,02	1,24	3,57	0,70
	30	7,11	1,71	6,09	2,47	9,86	2,61	5,75	1,16
	60	11,16	2,65	9,46	3,14	14,94	3,87	9,58	2,05
Lisa	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	5	0,93	0,49	1,25	0,10	3,40	0,98	0,49	0,17
	10	1,39	0,85	2,05	0,05	5,56	1,18	0,76	0,27
	15	1,87	1,28	2,88	0,05	7,71	1,38	1,06	0,32
	30	3,14	2,28	5,04	0,05	13,51	2,01	1,77	0,63
	60	5,26	4,05	8,93	0,15	24,66	3,63	3,18	1,22

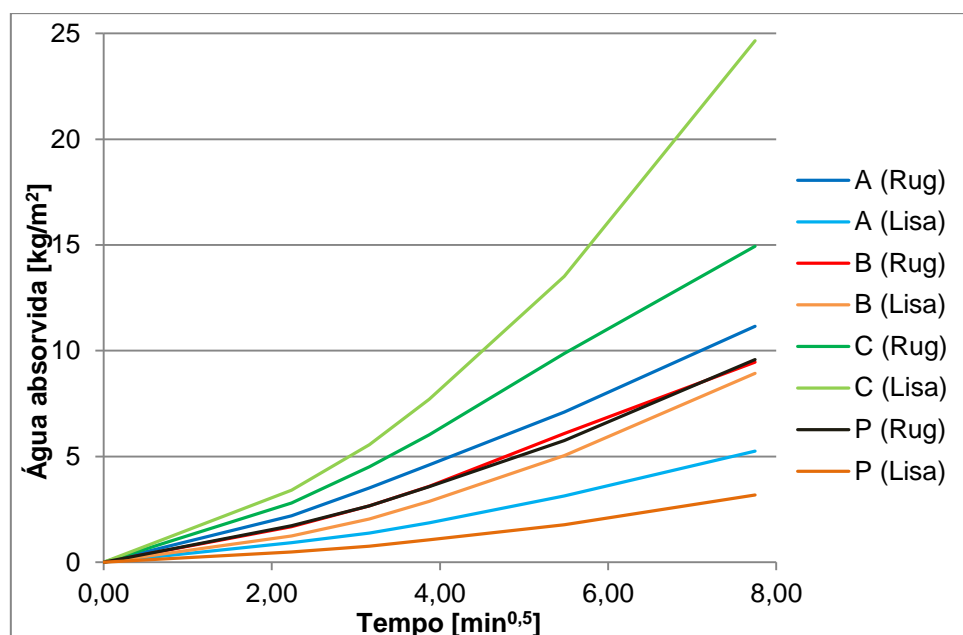


Fig. 3.13 – Curvas de absorção de água sob baixa pressão por unidade de área em função da raiz do tempo

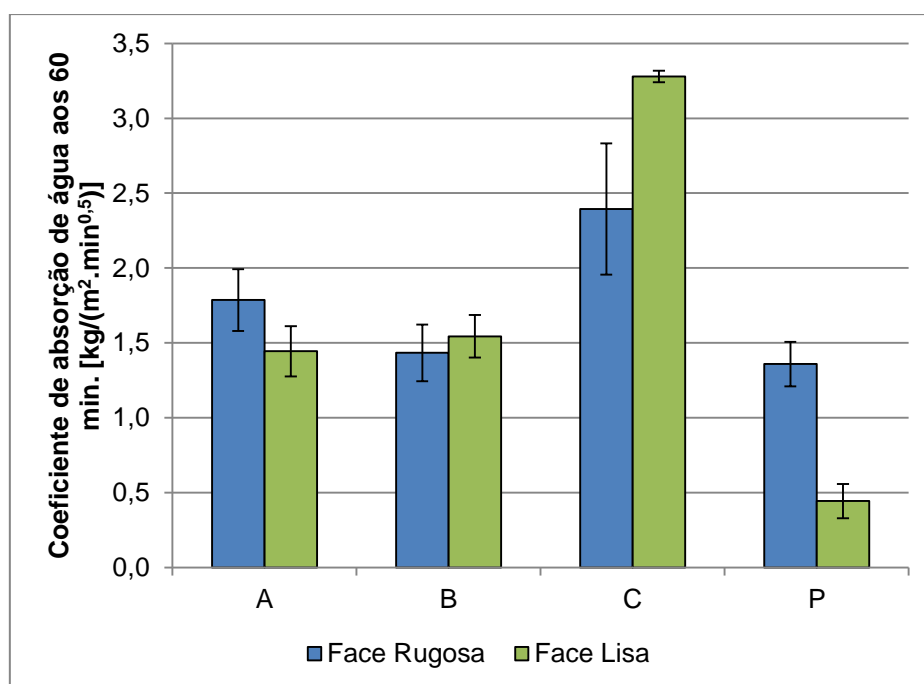


Fig. 3.14 – Coeficiente de absorção de água em ambas as faces aos 60 min. de ensaio

Com a análise do Quadro 3.7 e da Figura 3.14, que mostra os coeficientes de absorção de água aos 60 minutos de ensaio, conclui-se que entre os betões com terra, o betão B é o que apresenta um melhor comportamento na face rugosa e o betão A na face lisa, sendo no entanto os valores de ambos bastante próximos. Já o betão C é o que em ambas as faces apresenta um comportamento mais deficitário, notando-se também uma inversão no padrão de comportamento nas faces relativamente aos betões A, B e P; no betão C a face lisa absorve maior quantidade de água.

Fazendo uma análise comparativa entre betões com terra e o betão padrão, é no betão padrão que se observa um melhor comportamento na face lisa, com um coeficiente de absorção de água aos 60 minutos duas vezes inferior ao valor mais baixo verificado nos betões com terra; na face rugosa verifica-se que o betão com terra B apresenta um valor ligeiramente inferior de coeficiente de absorção de água aos 60 minutos que o betão padrão; no entanto não se considera essa diferença significativa devido às limitações de leitura do ensaio.

### **3.6. Absorção de água por capilaridade**

O ensaio de absorção de água por capilaridade tem como objetivo a determinação do coeficiente de capilaridade, assim como do valor assintótico da curva de absorção da água que traduzem, respetivamente, a velocidade de absorção de água obtida através do declive inicial da curva de absorção e o valor máximo de água absorvido por capilaridade.

Este ensaio foi realizado com base nas normas EN 1015-18 (CEN, 2002) e EN 15801 (CEN, 2009), tendo sido efetuadas algumas adaptações. Foram ensaiados provetes de dimensões 5x5x10 [cm], em que as suas faces laterais (com altura de 5cm) foram envolvidas por película de polietileno, garantindo que as faces superiores e inferiores (com área de 5x10 [cm]) se encontravam livres, e de seguida foi colocado um pedaço de tecido fino na face inferior (que irá estar em contacto com a água) a fim de garantir que não haveria perda de material durante o ensaio. Foram ensaiados seis provetes por lajeta, três com a face lisa (em contacto com o molde) em contacto com a água e três com a face rugosa (que não esteve em contacto com o molde), o que corresponde a cinquenta e quatro provetes de betão com terra e doze provetes de betão padrão, perfazendo um total de sessenta e seis provetes ensaiados. Após a preparação dos provetes estes foram colocados em estufa a 60º C, num período mínimo de 48 horas antes do início do ensaio, para atingirem condições de massa constante. O ensaio foi realizado aos 10 meses de idade dos provetes, em ambiente de humidade relativa e temperatura controladas de 65±5% e 20±2°C respetivamente.

- **Material**

- Tecido;
- Elásticos;
- Película de polietileno;
- Estufa;
- Balança de precisão 0,001g;
- Caixas estanques;
- Tabuleiro com rede plástica;
- Nível;
- Água;
- Régua.

- **Procedimento experimental**

- Prepararam-se os provetes com a colocação da película de polietileno nas faces laterais dos provetes e do tecido na face inferior do provete, seguro por um elástico e colocaram-se em estufa a 60° C durante 48 horas;
- Prepararam-se as caixas estanques para a realização do ensaio, nivelando o tabuleiro com a rede plástica dentro das caixas, mantendo uma lâmina de água com 5 mm acima da rede e criando condições de ambiente saturado nas caixas;
- Retiraram-se os provetes a ensaiar da estufa e foram deixados a arrefecer até atingir a temperatura ambiente;
- Pesaram-se os provetes;
- Introduziram-se os provetes dentro das caixas ordenadamente e com um desfasamento de 20 segundos entre provetes;
- Efetuaram-se pesagens aos 5, 10, 15, 30 e 60 minutos e durante as primeiras 5 horas de ensaio;
- Efetuou-se outra pesagem 23 horas após o início do ensaio e deu-se o mesmo por terminado;
- Traçou-se a curva de absorção tendo como ordenada a massa de água absorvida pelo provete por unidade de área [ $\text{kg/m}^2$ ] e, como abcissa, a raiz quadrada do tempo decorrido [ $\text{min}^{0.5}$ ].

O desfasamento de 20 segundos na colocação inicial dos provetes nas caixas prende-se com o facto de durante o processo de pesagem ser necessário retirar os provetes da caixa, escorrer o excesso de água evitando a pesagem indevida de água excedente, registar a leitura e colocar novamente os provetes dentro da caixa, garantindo-se assim, com o desfasamento, que todos os provetes se encontram o mesmo período de tempo em contacto com a água. Houve também o cuidado de garantir em todo o ensaio que a lâmina de água mantinha os 5 mm, acrescentando água sempre que necessário, e que as caixas se encontravam corretamente fechadas de forma a garantir um ambiente saturado.

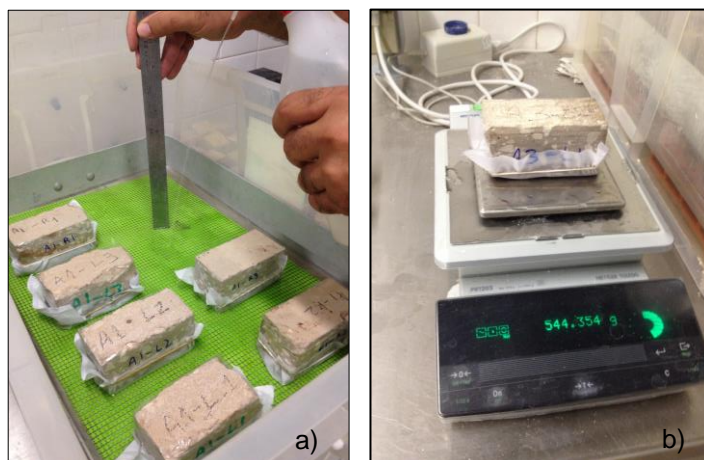


Fig. 3.15 – Reposição de água durante o ensaio (a); Pesagem dos provetes (b)

**Resultados obtidos no ensaio:**

Na continuação do estudo do comportamento dos betões em contacto com água, a realização do ensaio de absorção de água por capilaridade permite, para além do traçado das curvas de absorção de água por capilaridade, que são apresentadas na Figura 3.18 e que traduzem a quantidade de água absorvida por área de contacto em função da raiz do tempo de ensaio decorrido, o cálculo de dois parâmetros distintos: o valor assintótico (VA), que representa o máximo da quantidade de água absorvida pelo betão, e o coeficiente de capilaridade (CC), que se obtém através do declive inicial da curva de absorção de água e que traduz a velocidade dessa mesma absorção.

Como foi anteriormente referido, no ensaio de absorção de água por capilaridade foram estudadas ambas as faces dos provetes, com o intuito de verificar a existência de diferenças significativas de comportamento; no entanto tal não foi verificado, tendo ambas as faces apresentado comportamento semelhante, pelo que os valores apresentados correspondem às médias e respetivos desvios padrão dos betões, sem haver distinção entre faces. No Quadro 3.8 registam-se os valores médios e desvios padrão do coeficiente de capilaridade e do valor assintótico dos betões.

Quadro 3.8 – Valores médios e desvios padrão do coeficiente de capilaridade e do valor assintótico

Betões	CC [ $\text{kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$ ]		VA [ $\text{kg/m}^2$ ]	
	Med	dp	Med	dp
A	0,69	0,01	12,36	1,70
B	0,69	0,06	11,15	0,36
C	1,25	0,10	11,76	0,26
P	0,60	0,08	8,58	0,04

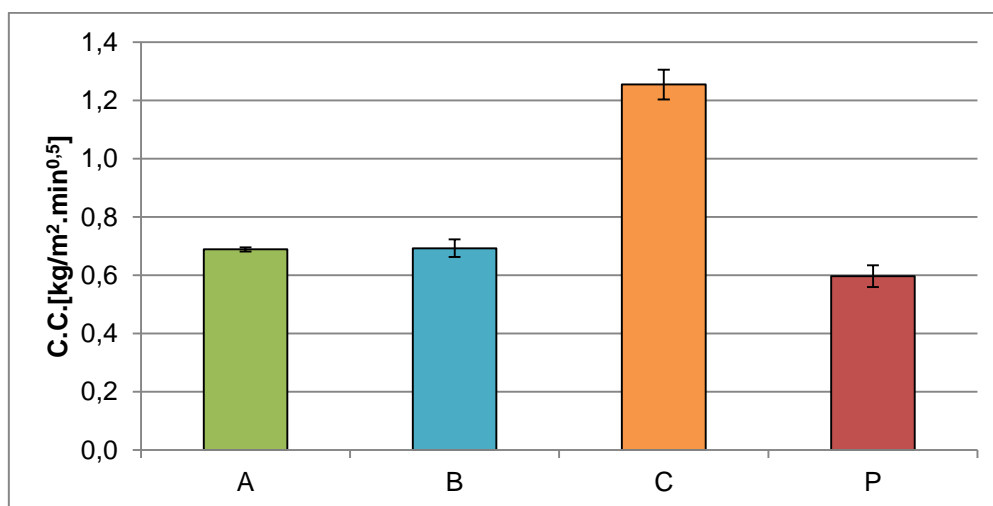


Fig. 3.16 – Coeficientes de capilaridade dos betões



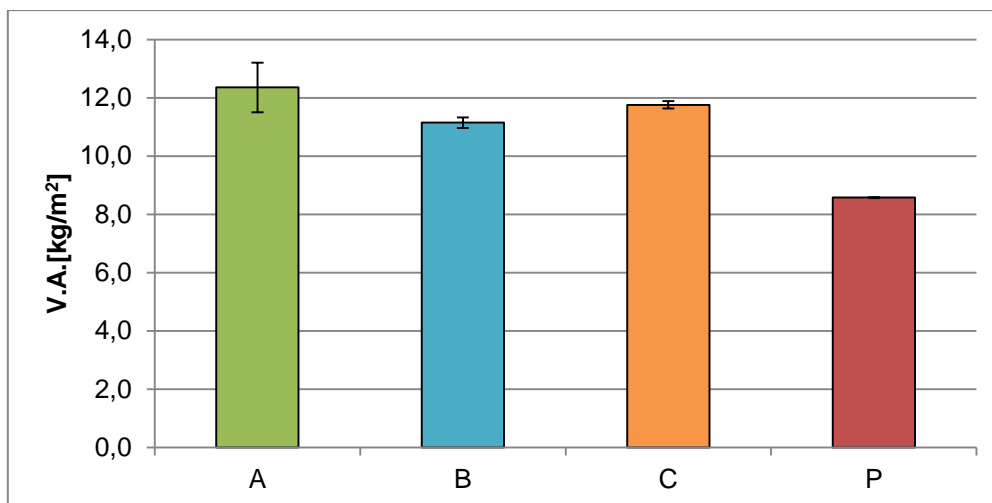


Fig. 3.17 – Valores assintóticos dos betões

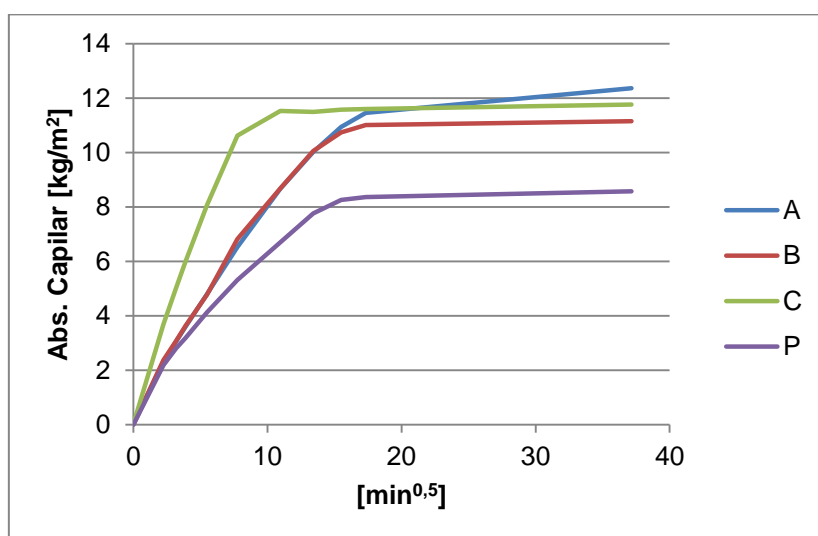


Fig. 3.18 – Curvas de absorção de água por capilaridade

Na Figura 3.17 é possível observar que, entre os betões com terra, o betão A é aquele que apresenta o mais elevado valor assintótico; no entanto é a este que corresponde o valor mais baixo registado de coeficiente de capilaridade, havendo no entanto uma proximidade entre os valores de coeficiente de capilaridade dos betões A e B.

Em relação ao betão C, o seu valor assintótico é bastante próximo dos verificados nos outros betões com terra, sendo no coeficiente de capilaridade este o betão que se destaca pelo seu elevado valor, quase o dobro do valor registado nos restantes betões com terra. Este facto permite concluir que, apesar do betão C ser aquele que apresenta uma maior quantidade de solo, tal não influencia significativamente a quantidade total de água absorvida pelo betão, mostrando apenas ser preponderante na velocidade inicial de absorção de água.

Fazendo uma análise comparativa entre os valores obtidos para os betões com terra e o betão padrão, em ambos os parâmetros o betão padrão apresenta um melhor desempenho, ou seja,

é este o betão que obtém os valores mais baixos, absorvendo mais lentamente a água e em menor quantidade. No entanto, os betões A e B apresentam um comportamento não muito distante.

### 3.7. Secagem

O ensaio de secagem inicia-se imediatamente após o final do ensaio de capilaridade, fazendo corresponder o valor inicial de secagem ao valor da última pesagem registada no ensaio de capilaridade.

Este ensaio permite traçar as curvas de secagem características dos diferentes materiais e, através da sua análise, é possível determinar dois parâmetros que traduzem o comportamento desse mesmo material, sendo estes a taxa de secagem (TS), que traduz a velocidade inicial de secagem, e o índice de secagem (IS), que traduz o comportamento de secagem a longo prazo. A taxa de secagem é determinada através do declive da reta tangente ao troço inicial da curva de secagem, o que significa que a secagem inicial de um provete é tão mais favorecida quanto maior for o seu valor de taxa de secagem. Já o índice de secagem é obtido através do método descrito por Brito *et al.* (2011), que se baseia numa especificação de ensaio da (RILEM, 1980b) e na norma italiana NORMAL 29/88 (CNR/ICR, 1991), e utiliza o método simplificado de integração numérica através da soma sucessiva de trapézios; quanto menor o valor deste índice mais fácil será completar a secagem.

Este ensaio foi realizado nos provetes de dimensões 5x5x10 [cm] provenientes do ensaio de capilaridade, mantendo a película de polietileno e o pedaço de tecido de forma a proteger os provetes e a garantir que a evaporação de água é apenas efetuada pela parte superior do provete em contacto com o ar, de forma unidirecional. O ensaio decorreu em ambiente controlado a uma humidade relativa constante de 65% e a 20° C de temperatura, nos provetes com 10 meses de idade.

- **Material**

- Bancada metálica impermeável;
- Balança de precisão 0,001g.

- **Procedimento experimental**

- Após efetuada a última pesagem do ensaio de capilaridade retiraram-se os provetes do contacto com a lâmina de água;
- Colocaram-se os provetes na bancada metálica impermeável e pesaram-se os mesmos durante as primeiras cinco horas de ensaio;
- Seguidamente efetuaram-se pesagens diárias durante trinta e quatro dias, totalizando oitocentas e dezasseis horas;
- Após terminado o ensaio traçou-se a curva de secagem e determinou-se a taxa de secagem obtida através do declive inicial da reta da curva de secagem, o valor de teor em água através da Equação 3.2 e o índice de secagem através de somas sucessivas de trapézio (Brito *et al.*, 2011) segundo a Equação 3.3.

$$w_i = \frac{m_i - m_0}{m_0}$$

(Eq. 3.2)

Onde:

$w_i$  – teor de água no instante  $t_i$  [%];

$m_i$  – massa do provete no instante  $t_i$  [g];

$m_0$  – massa do provete seco [g].

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^n \left[ (t_i - t_{i-1}) \times \left( \frac{w_{t_{i-1}} + w_{t_i}}{2} \right) \right]}{w_{m\acute{a}x} \times t_f}$$

(Eq. 3.3)

Onde:

IS- índice de secagem;

$t_i$ - tempo de ensaio decorrido até ao instante  $i$  [h];

$t_{i-1}$ - tempo de ensaio decorrido até ao instante anterior a  $i$  [h];

$t_f$ - tempo total do ensaio [h];

$w_{ti}$ - teor em água no instante  $i$  [%];

$w_{m\acute{a}x}$ - teor em água máximo do provete ( $t=0$ ) [%].



Fig. 3.19 – Ensaio de secagem (a); Condições de secagem (b)

#### Resultados obtidos no ensaio:

No Quadro 3.9 encontram-se registados os valores de média e desvio padrão do índice de secagem e da taxa de secagem obtidos nos diferentes betões e, tal como foi referido no ensaio de capilaridade, também neste ensaio foram analisadas ambas as faces dos provetes, de forma a detetar diferenças de comportamento entre estas, não tendo sido no entanto verificada qualquer diferença significativa, pelo que novamente os valores apresentados corresponderam à média dos valores registados em ambas as faces.

Quadro 3.9 – Valores médios e de desvio padrão do índice de secagem e taxa de secagem

Betão	IS [-]		TS [ $\text{kg/m}^2\cdot\text{h}$ ]	
	Méd	dp	Méd	dp
A	0,32	0,04	0,09	0,02
B	0,26	0,02	0,10	0,00
C	0,17	0,03	0,11	0,01
P	0,33	0,03	0,07	0,00

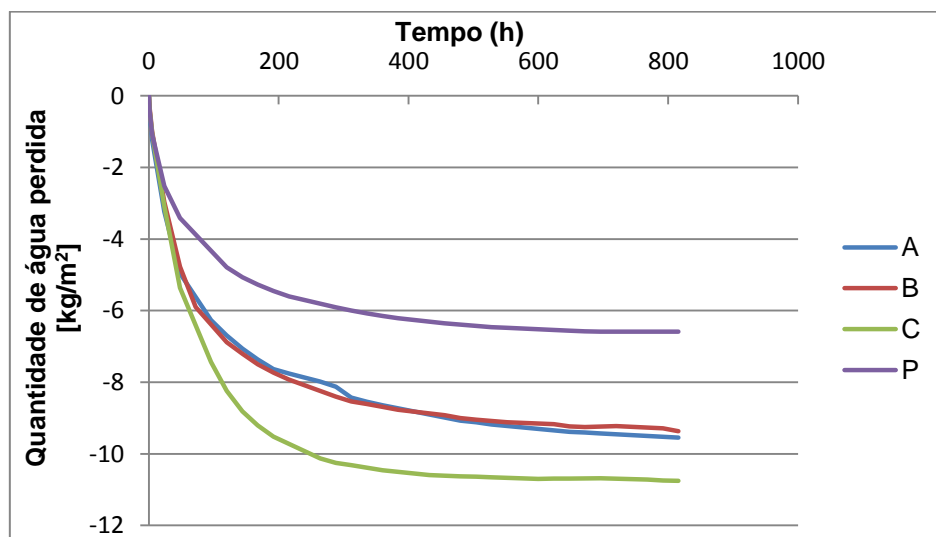


Fig. 3.20 – Curvas de secagem dos betões

Na Figura 3.20 são apresentadas as curvas de secagem referentes aos ensaios efetuados, as quais foram obtidas através da massa de água remanescente por área de secagem, determinada a partir das pesagens ao longo do tempo, em ordenadas e com o tempo de ensaio decorrido em abcissas.

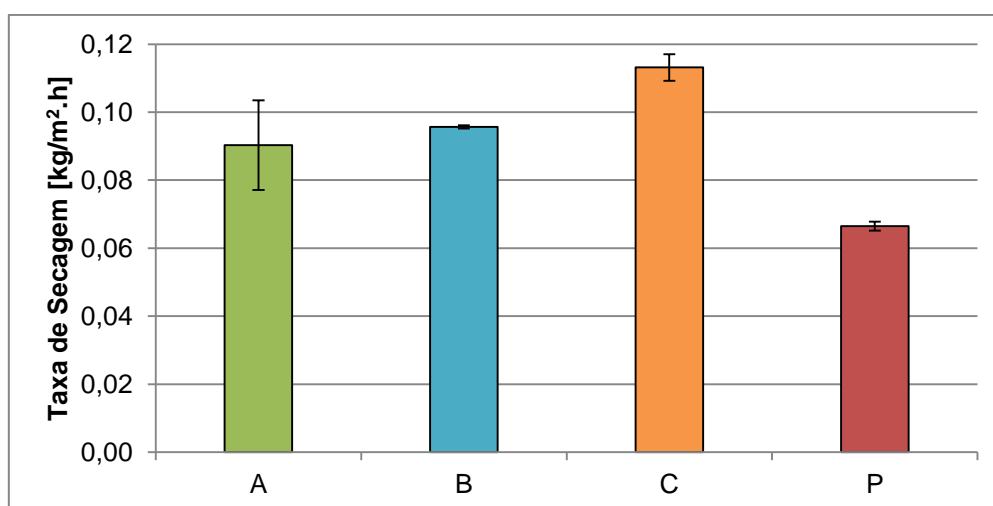


Fig. 3.21 – Taxa de secagem dos betões

Na Figura 3.21 podem ser consultados os resultados referentes à taxa de secagem, em que um valor mais elevado de taxa de secagem implica uma maior velocidade inicial de secagem, o que demonstra ser benéfico para o processo evaporativo da água. Analisando os resultados obtidos, o betão C é o que apresenta o valor mais elevado de taxa de secagem, enquanto o betão P apresenta o menor valor de velocidade inicial de secagem.

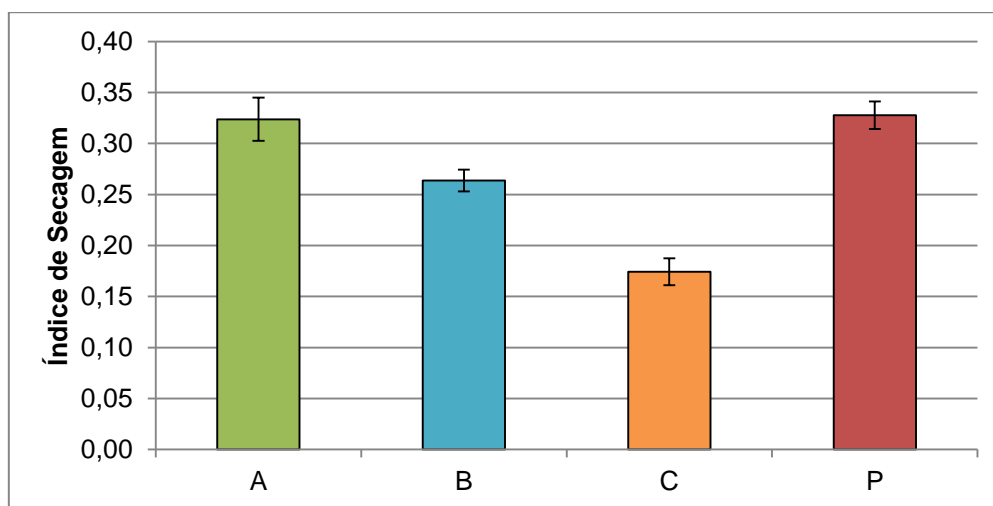


Fig. 3.22 – Índice de secagem dos betões

Analisando a Figura 3.22 novamente o betão C é o que apresenta um comportamento mais favorável de índice de secagem, em que um valor mais baixo deste índice indica uma maior facilidade de evaporação da água ao longo do tempo. No lado oposto o betão P apresenta o valor mais elevado de índice de secagem.

### 3.8. Resistência à tração por flexão

O ensaio de resistência à tração por flexão foi baseado na norma EN 1015-11 (CEN, 1999), tendo sido utilizada uma máquina universal Zwick/Rowell, com uma célula de carga de 50 kN. A tração no provete foi imposta por flexão em três pontos, dois pontos nos apoios da máquina e um na extremidade da célula de carga a meio do provete.

Este ensaio foi realizado aos 11 meses e meio de idade nos provetes de dimensões 5x5x15 [cm], tendo sido utilizados três provetes de cada lajeta, num total de nove provetes por betão com terra e seis provetes de betão padrão, perfazendo assim trinta e três provetes ensaiados.

- **Material**

- Máquina universal Zwick/Rowell;
- Acessórios.

- **Procedimento experimental**

- Colocaram-se os acessórios e a célula de carga para a realização do ensaio na máquina universal Zwick/Rowell;
- Colocou-se o provete na máquina para ensaio;
- Aplicou-se a carga de 50 kN e deu-se início ao ensaio;
- Deu-se por terminado o ensaio quando foi atingido o valor máximo da força;
- Determinou-se o valor da resistência à flexão através da Equação 3.4:

$$R_t = 1,5 \times F \times \frac{L}{b \times d^2}$$

(Eq. 3.4)

Onde:

$R_t$  – resistência à tração por flexão [MPa]

$F$  – força máxima [N]

$L$  – comprimento do provete entre apoios [mm]

$B$  – dimensão da base do provete [mm]

$D$  – altura do provete [mm]

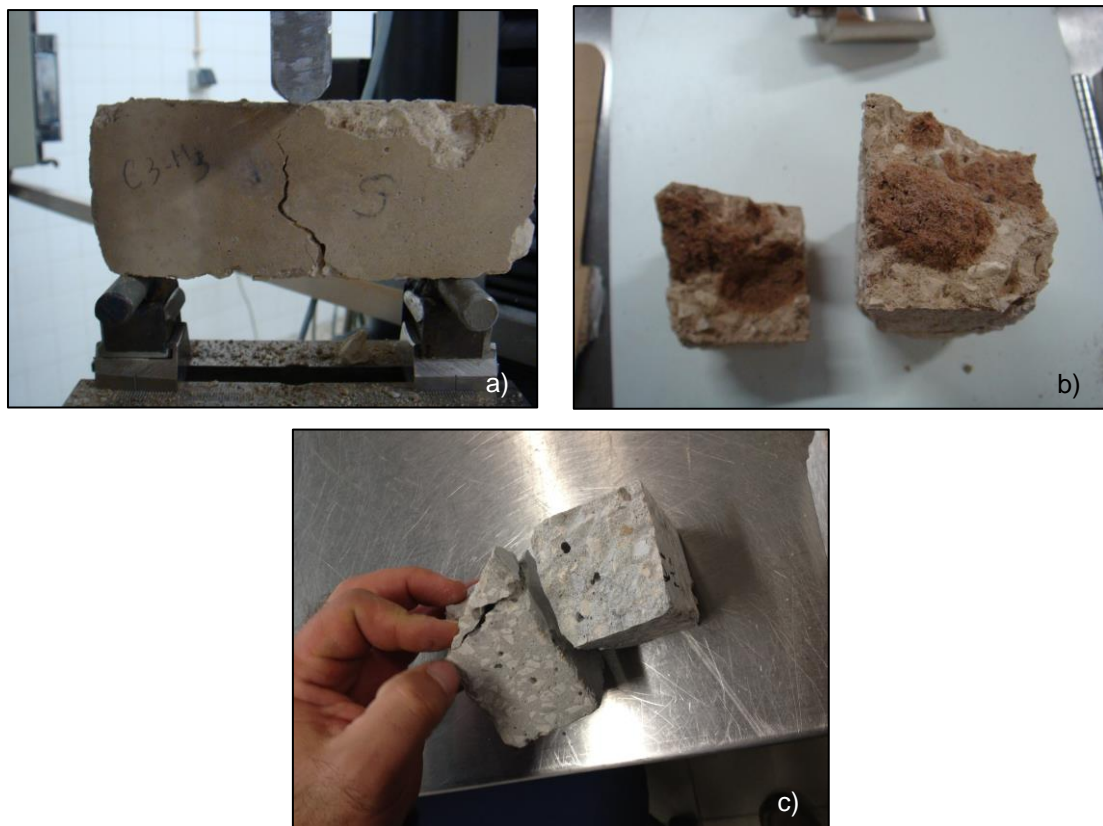


Fig. 3.23 – Ensaio de resistência à tração por flexão (a); Aglomerados de terra no betão C (b); Poros/vazios de grandes dimensões no betão padrão

O valor da resistência à tração por flexão de cada betão (betão com terra e betão padrão) corresponde à média dos valores obtidos nos ensaios aos nove provetes de cada betão.

#### Resultados obtidos no ensaio:

No Quadro 3.10 são apresentados os valores médios e de desvio padrão da resistência à tração por flexão dos quatro betões em estudo.

Quadro 3.10 – Valores médios e de desvio padrão da resistência à tração por flexão

Betão	$R_t$ [Mpa]	
	Med	dp
A	1,89	0,47
B	1,59	0,31
C	0,46	0,15
P	4,69	0,69

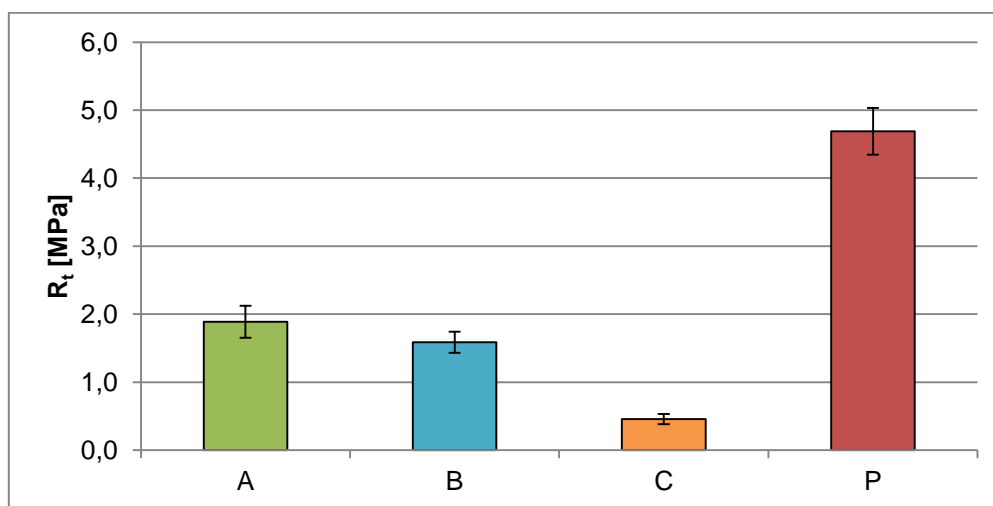


Fig. 3.24 – Resistência à tração por flexão dos betões

Fazendo uma análise da Figura 3.24, entre os diferentes betões com terra estudados o betão A é o que apresenta um valor mais elevado de resistência à tração, mas bastante próximo do valor atingido no betão B. No entanto o betão P apresenta um valor bastante mais elevado de resistência à flexão. Importa também realçar novamente o facto terem sido detetados grandes aglomerados de terra no interior dos provetes de betão com terra, como mostra a Figura 3.23b), assim como no betão padrão foram detetados poros de maior dimensão no interior dos provetes, como se pode observar na Figura 3.23 c).

### 3.9. Resistência à compressão

À semelhança do ensaio anterior, o ensaio de resistência à compressão foi realizado com base na norma EN 1015-11 (CEN, 1999), tendo sido utilizada uma máquina universal Zwick/Rowell, com uma célula de carga de 50 kN, recorrendo a acessórios adaptados à dimensão dos provetes.

Este ensaio foi realizado aos 11 meses e meio de idade numa das metades dos provetes resultantes da realização do ensaio de resistência à tração por flexão com dimensões de, aproximadamente, 5x5x7,5 [cm], tendo sido ensaiados três provetes de cada lajeta, num total de nove provetes por betão com terra e seis provetes de betão padrão, perfazendo assim trinta e três provetes ensaiados.

Posteriormente foram também ensaiados provetes resultantes dos ensaios de capilaridade e de secagem, com o intuito de avaliar a influência da ação da água na resistência à compressão nos betões. Assim, foram analisados provetes com dimensões de 5x5x10 [cm] num total de trinta e três provetes ensaiados dos quatro betões.

- **Material**

- Máquina universal Zwick/Rowell;
- Acessórios.

- **Procedimento experimental**

- Colocaram-se os acessórios e a célula de carga para a realização do ensaio na máquina universal Zwick/Rowell;
- Colocou-se o provete na máquina para ensaio;
- Aplicou-se a carga de 50 kN e deu-se início ao ensaio;
- Deu-se por terminado o ensaio quando foi atingido o valor máximo da força  $F$  [N];
- Determinou-se o valor da resistência à compressão  $R_c$  [MPa] através do quociente entre a força máxima [N] e a área da base do provete [mm<sup>2</sup>].

O valor da resistência à compressão de cada betão (betão com terra e betão padrão) corresponde à média dos valores obtidos nos ensaios aos nove provetes de cada betão.



Fig. 3.25 – Ensaio de compressão



**Resultados obtidos no ensaio:**

No Quadro 3.11 encontram-se apresentados os valores de resistência à compressão dos provetes, sem terem tido contacto com água, de todos os betões.

Quadro 3.11 – Valores médios e desvios padrão da resistência à compressão dos betões

Betão	R <sub>c</sub> [Mpa]	
	Med	dp
A	8,01	6,81
B	7,05	1,68
C	2,22	0,40
P	16,18	2,26

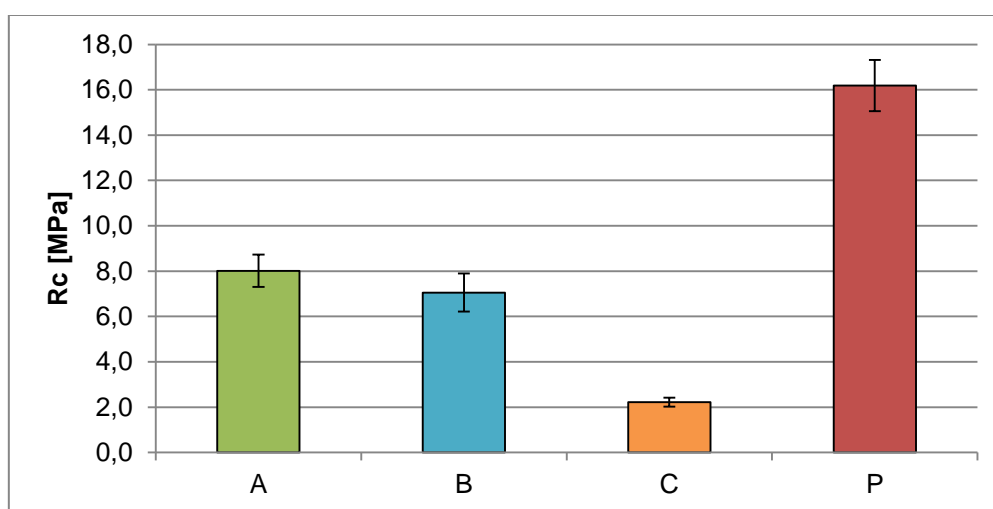


Fig. 3.26 – Resistência à compressão dos betões

Analisando a Figura 3.26, entre os betões com terra, o betão A é o que apresenta o mais elevado valor de resistência à compressão e o betão C o que regista o valor mais baixo. Comparativamente, o betão P apresenta um valor significativamente superior a qualquer um dos registados nos betões com terra.

No Quadro 3.12 são apresentados os valores médios e de desvio padrão da resistência à compressão antes e após o contacto com água. Observando este quadro verifica-se que o valor da resistência à compressão de P após o contacto com a água não foi registado; tal prende-se com o facto de não ter sido possível completar o ensaio, ou seja, atingir o valor máximo de resistência à compressão destes provetes, pois o valor dessas mesmas resistências sofreram um incremento e o valor máximo de força conferido pela máquina universal foi atingido, obrigando à interrupção do ensaio de forma a evitar danificar o material.

Quadro 3.12 – Valores médios e desvios padrão de resistência à compressão antes e após o contacto com água

Betão	Rc antes água [Mpa]		Rc após água [Mpa]		$\Delta R_c$ [%]
	Med	dp	Med	dp	
A	8,01	1,43	7,14	1,65	10,84
B	7,05	1,68	6,25	1,37	11,43
C	2,22	0,40	1,86	0,73	16,17
P	16,18	2,26	-	-	-

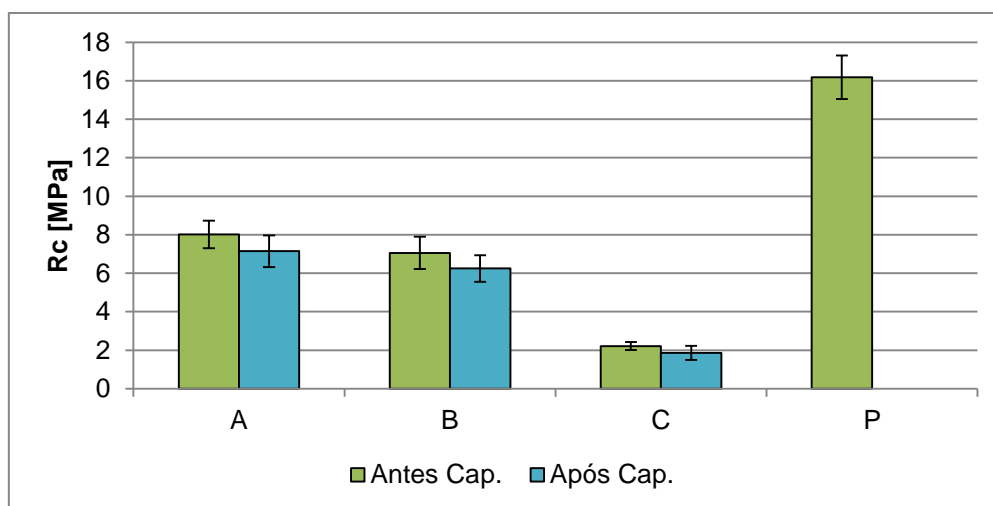


Fig. 3.27 – Resistência à compressão antes e após contacto com água

Através da análise do Quadro 3.12 e da Figura 3.27 nota-se um decréscimo do valor da resistência à compressão por parte dos betões com terra, variando este entre os 10,8% e 16,2%, sendo o betão C o que apresenta maior perda de resistência à compressão após o contacto com a água. Em relação ao betão P, e embora não tenha sido possível registar o valor, existiu um aumento da resistência à compressão após o contacto com a água.

### 3.10. Resistência ao ataque por sulfatos

Com este ensaio pretende-se avaliar a evolução da integridade dos betões após serem sujeitos a ciclos de secagem/imersão em solução contaminada com a presença de sulfatos. O ensaio de resistência ao ataque por sulfatos foi baseado na norma NP EN 12370-2001 para ensaios em pedras naturais e em estudos realizados por Faria (2004) para argamassas de forma a determinar a concentração a utilizar, sendo que para este ensaio foi utilizada uma solução concentrada com 6,17% de sulfato anidro.

Neste ensaio foram utilizadas as segundas metades resultantes do ensaio de resistência à tração por flexão, ou seja, três provetes por lajeta o que corresponde a nove provetes por betão com

terra e a seis provetes de betão padrão, totalizando trinta e três provetes ensaiados. Aquando da realização deste ensaio os provetes tinham 1 ano de idade.

- **Material**

- Estufa ventilada a 105°C;
- Tabuleiros metálicos e estrados plásticos;
- Solução de 6,17% de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>;
- Balança de precisão 0,001g;
- Caixas plásticas com tampa.

- **Procedimento experimental**

- Previamente ao início do ensaio colocaram-se os provetes em estufa ventilada a 105°C até atingirem massa constante;
- Preparou-se uma solução saturada com 6,17% de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> utilizando 658g de sulfato de sódio anidro por cada 10l de água;
- Distribuiu-se a solução pelas caixas plásticas e colocaram-se estrados plásticos no fundo destas;
- Retiraram-se os provetes da estufa após estes terem atingido massa constante e deixam-se arrefecer;
- Pesaram-se os provetes;
- Seguidamente colocaram-se os provetes totalmente imersos na solução durante 2 horas, garantindo um afastamento suficiente das extremidades da caixa e entre provetes;
- Após as 2 horas de imersão, retiraram-se os provetes da solução, acondicionaram-se em tabuleiros metálicos e foram novamente colocados em estufa a 105°C;
- Os provetes ficaram em estufa durante 1 semana de forma a garantir a completa secagem;
- Findo o tempo de secagem repetiu-se novamente o procedimento de imersão e secagem durante 25 ciclos, observando a degradação ao longo dos ciclos e dando por terminado o ensaio quando houve degradação total de provetes;
- Após efetuados 25 ciclos analisaram-se as variações de massa através da Equação 3.5, traçando-se curvas que expressam a variação de massa ao longo do ensaio.

$$\Delta M = \frac{m_i - m_0}{m_0} \times 100$$

(Eq. 3.5)

Onde:

$\Delta M$  – variação de massa [%]

$m_i$  – massa do provete no final do ciclo  $i$  [g]

$m_0$  – massa inicial do provete [g]



Fig. 3.28 – Sulfato de sódio anidro (a); Imersão dos provetes em solução na solução (b); Provetes em estufa ventilada a 100°C (c)

#### Resultados obtidos no ensaio:

Devido ao facto da resistência aos sulfatos ser condicionada, por um lado pela ação química devida a compostos expansivos que se formam entre os constituintes hidratados do betão e os sulfatos (do tipo da etringite) mas, por outro lado, pela resistência mecânicas do próprio betão (Faria, 2009), é expectável que o betão padrão apresente uma resistência ao ataque por sulfatos bastante superior.

Na Figura 3.29 é apresentada a evolução da perda de massa dos provetes ao longo de 25 ciclos de ensaio, correspondendo estas curvas à média aritmética dos valores de perda de massa obtidos nos nove provetes ensaiados do mesmo betão. Importa salientar ainda o facto de, por se tratar de um ensaio com forte presença de água, a terra não envolta pela pasta do betão ter tendência a desfazer-se só por si, conduzindo a perda de massa direta.

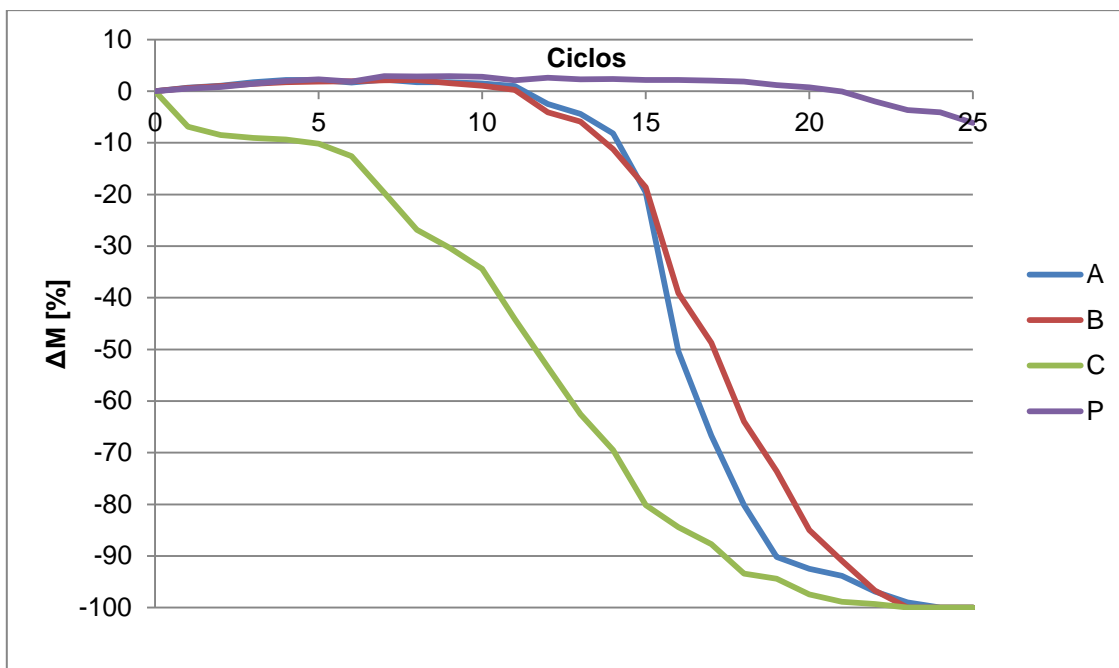


Fig. 3.29 – Evolução da variação de massa dos betões no ensaio de resistência aos sulfatos

É possível observar através da Figura 3.29 que o betão C é o que apresenta uma maior perda de massa nos ciclos iniciais de ensaio, enquanto os outros betões com terra A e B apresentam um comportamento bastante semelhante começando a haver uma perda de massa apenas a partir do 11º ciclo; no entanto os três betões com terra completaram 20 ciclos sem haver perda completa de massa (Figura 3.31), embora com uma enorme degradação. A perda de massa verificada no betão C logo desde o início do ensaio prende-se com facto de ser este o betão que apresentava maior quantidade de aglomerados de terra, e como foi acima referido, ao entrar em contacto com a água houve uma imediata desagregação destes aglomerados, como mostra a Figura 3.30 a), não estando esta perda de massa diretamente ligada à ação dos sais, ação esse objeto de estudo neste ensaio.

O betão padrão apresenta um acréscimo de massa até ao 18º ciclo, começando a haver uma perda massa só a partir do 20º ciclo.

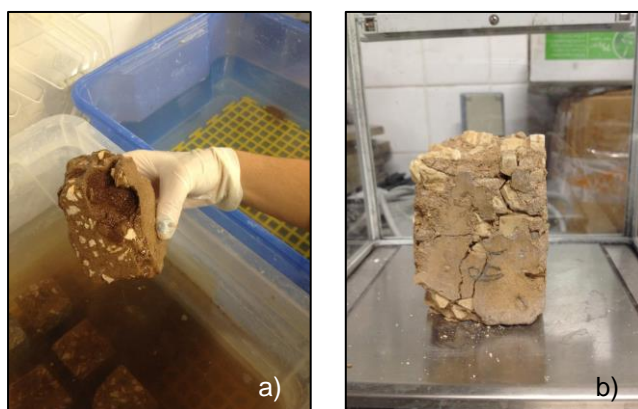


Fig. 3.30 – Cavidade deixada após a desagregação de aglomerado de terra no provete (a); Rutura devido à ação dos sulfatos em provete do betão B (b)

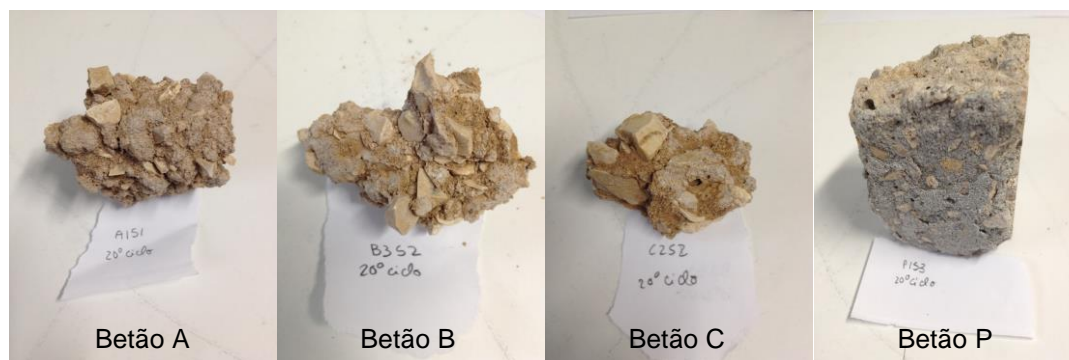


Fig. 3.31 – Betões após 20 ciclos de secagem/imersão em sulfatos

Constatou-se assim que, através deste ensaio de ataque por sulfatos, os betões de terra, nomeadamente através do contacto da solução com as suas superfícies de corte, por vezes com a terra sem estar bem homogeneizada no betão, apresentaram um comportamento muito pior que o betão padrão. No entanto salienta-se o facto de este ser efetivamente um ensaio muito agressivo e possivelmente sem paralelismo com a realidade mais corrente.

### 3.11. Porosidade aberta

Este ensaio permite calcular o valor da porosidade aberta, assim como a determinação da massa volúmica das amostras. Este ensaio foi realizado segundo a ficha de ensaio 02 para pedras naturais e artificiais (Henriques, 1996) e com base na norma NP EN 1936 (IPQ, NP EN 1936:2008- Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta, 2008) para ensaio de pedra natural.

Para este ensaio foram utilizadas amostras íntegras de pequenas dimensões obtidas após a realização do ensaio de compressão, sendo que estas foram limpas e envolvidas com meias de vidro fechadas com fio de náilon e seguidamente colocadas em estufa a 60°C durante mais de 48 horas até atingirem massa constante. A utilização de meias de proteção prende-se com o facto da terra mal homogeneizada dos provetes, tal como referido anteriormente, se desagregar em presença de água, garantindo-se assim, com esta proteção, de forma a evitar perda de massa durante o ensaio. No total foram ensaiadas trinta amostras envoltas em meias de vidro, tendo sido adicionalmente ensaiadas seis amostras de betão padrão sem a proteção da meia de vidro não existindo o perigo de perda de matéria das amostras em contacto com a água, com o intuito de aferir o impacto causado pela utilização das meias de proteção. Aquando da realização deste ensaio as amostras tinham 1 ano e 1 mês de idade.

- **Material**

- Meias de vidro;
- Fio de nylon;
- Estufa;

- Balança de precisão 0,001g com rede para pesagem hidrostática;
- Exsicador;
- Bomba de vácuo;
- Água.

• **Procedimento experimental**

- Prepararam-se os provetes com a colocação das meias de vidro fechadas com fio de nylon e colocaram-se os provetes em estufa a 60° C durante 48 horas;
- Retiraram-se as amostras da estufa e pesaram-se;
- Colocaram-se os provetes no exsicador;
- Ligou-se a bomba de vácuo durante 24 horas;
- Ao fim de 24 horas abriu-se a torneira da parte superior do exsicador e imergiram-se os provetes em água;
- Após 24 horas de imersão em água e em vácuo dos provetes, desligou-se a bomba de vácuo e abriram-se as entradas de ar do exsicador, ficando os provetes imersos em água à pressão ambiente;
- Passadas 72 horas do início do ensaio efetuaram-se as pesagens dos provetes; primeiro a pesagem hidrostática colocando a amostra num cesto pendurado na parte inferior da balança que se encontrava submerso e que permitiu a pesagem com o provete imerso; de seguida, após a eliminação do excesso de água superficial, realizou-se a pesagem do provete saturado;
- Com os valores obtidos nas pesagens determinou-se a percentagem de porosidade aberta, pela Equação 3.6, e valor da massa volúmica aparente através da Equação 3.7:

$$Pab = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \times 100$$

(Eq. 3.6)

Onde:

Pab – percentagem de porosidade aberta [%]

$m_1$  – massa seca da amostra [g]

$m_2$  – massa hidrostática da amostra [g]

$m_3$  – massa saturada da amostra [g]

$$MV_{ap} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times 10^3$$

(Eq. 3.7)

Onde:

$MV_{ap}$  – massa volúmica aparente [ $\text{kg/m}^3$ ]

$m_1$  – massa seca da amostra [g]

$m_2$  – massa hidrostática da amostra [g]

$m_3$  – massa saturada da amostra [g]

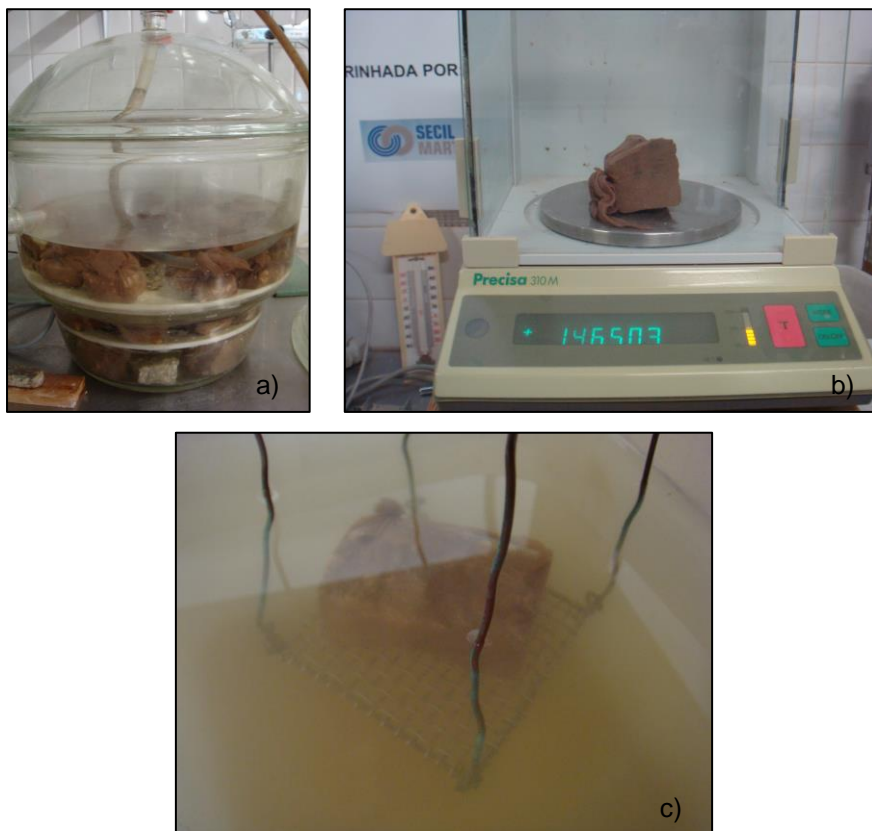


Fig. 3.32 – Exsicador em vácuo e com água (a); Pesagem do provete saturado (b); Pesagem do provete submerso (c)

#### Resultados obtidos no ensaio:

No Quadro 3.13 encontram-se os valores médios e respetivos desvios padrão dos valores de porosidade aberta ( $P_{ab}$ ) e da massa volúmica aparente ( $MV_{ap}$ ) dos diferentes betões. Neste quadro são também apresentados os valores referentes ao ensaio dos provetes de betão padrão sem meia de proteção ( $P^*$ ).

Na Figura 3.33 encontram-se representados graficamente os valores de porosidade aberta dos betões protegidos com meias de vidro e adicionalmente os valores de porosidade aberta do betão padrão sem meia. Analisando os betões com terra, os três apresentam valores bastante semelhantes, sendo no entanto o valor mais elevado verificado no betão B e o mais baixo no betão C. Entre os betões com terra e o betão padrão P ensaiado com meia de vidro, é no betão P que é registado o valor mais baixo de porosidade aberta.



Quadro 3.13 – Valores médios e de desvio padrão de porosidade aberta e massa volúmica aparente

Betões	P <sub>ab</sub> [%]		M <sub>ap</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	
	Med	dp	Med	dp
A	29,5	6,4	1734,8	221,0
B	30,3	4,1	1683,3	127,5
C	29,0	1,7	1732,4	79,6
P	19,3	3,6	1955,6	96,7
P*	15,6	0,7	2130,6	16,7

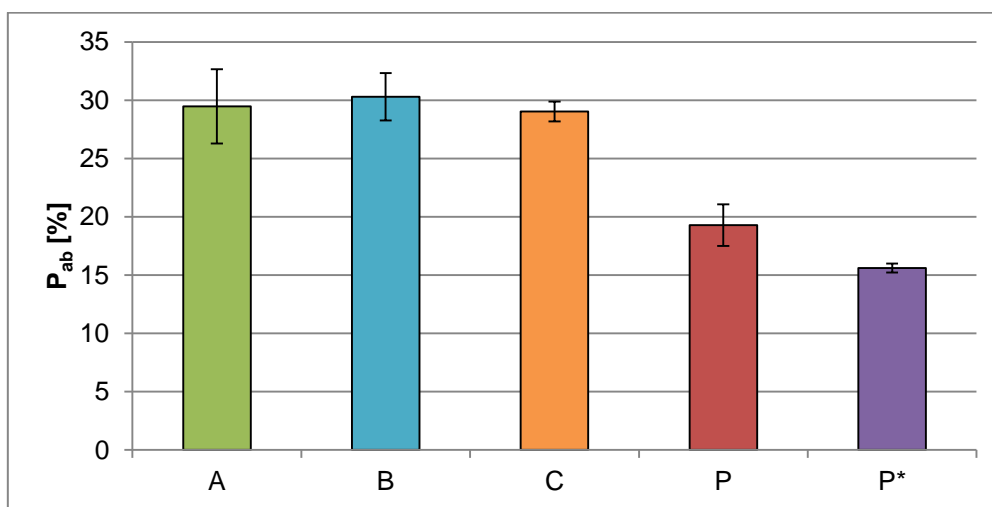


Fig. 3.33 – Porosidade aberta dos betões

Comparando os valores obtidos entre as amostras do betão padrão ensaiado com meia de vidro como proteção (P) e as amostras ensaiadas sem a meia (P\*), verifica-se há uma diminuição do valor de porosidade aberta na ordem dos 19%, assim como uma redução significativa do valor de desvio padrão, que se mostra bastante elevado nos ensaios utilizando a meia de vidro. Importa também referir que, como é visível na Figura 3.32, a água utilizada na pesagem, assim como a água do exsicador, encontravam-se turvas o que poderá indicar presença partículas de menores dimensões de terra, havendo uma perda de massa apesar da utilização das meias de proteção.

Analisando a Figura 3.34, que apresenta os valores de massa volúmica aparente, obtidos através do mesmo ensaio que permitiu o cálculo da porosidade aberta, verifica-se que entre os betões com terra o betão A apresenta o valor mais elevado de massa volúmica aparente, embora os valores de massa volúmica aparente dos três betões sejam bastante próximos. Fazendo novamente um comparação entre os betões com terra e o betão padrão P, este regista o valor maior de massa volúmica aparente.

Entre os valores obtidos nas amostras ensaiadas com meia de vidro (P) e as ensaiadas sem o auxílio dessa mesma meia (P\*), verifica-se novamente uma diferença entre resultados, havendo um

incremento do valor de massa volúmica aparente na ordem dos 9% nas amostras ensaiadas sem o uso de meias de vidro, voltando a registar-se uma diminuição do valor de desvio padrão.

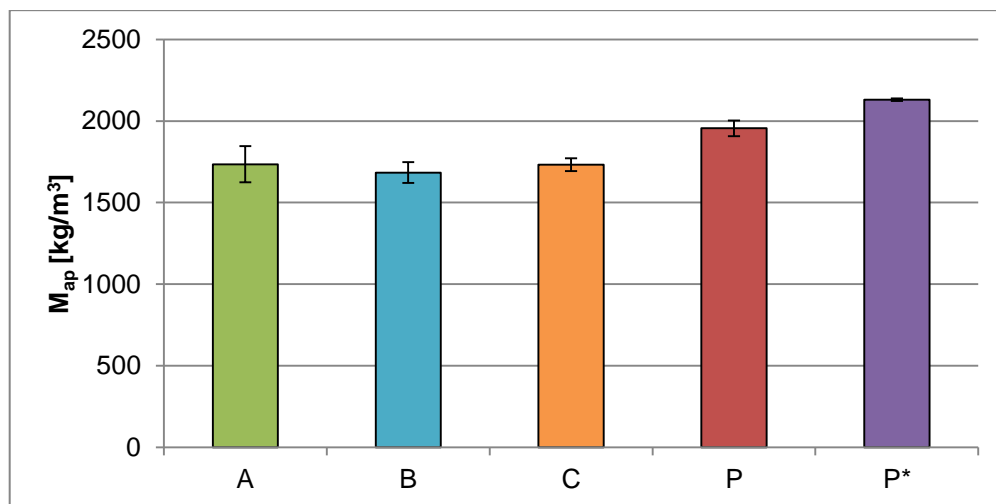


Fig. 3.34 – Massa volúmica aparente dos betões

Tendo em conta as diferenças verificadas entre as amostras P e P\*, estima-se que os valores resultantes deste ensaio sejam influenciados pela utilização de meia de vidro como proteção contra a perda de massa. No entanto, face à perda de material que ocorre sem a proteção, considera-se que o seu uso se justifica e a comparação entre os diferentes betões com a utilização da mesma proteção é eficiente.

### 3.12. Abrasão seca

Para a realização deste ensaio foi desenvolvida uma máquina própria, com o auxílio do Engenheiro Vitor Silva, que a idealizou e construiu, nos laboratórios do DEC-FCT. Esta máquina funciona utilizando um braço pneumático que possui uma escova de abrasão na extremidade com pesos, que realiza ciclos de desgaste superficial, utilizando para isso ar comprimido. Nas Figuras 3.35 e 3.36 é possível observar a máquina de desgaste, assim como a respetiva escova, antes de dar início ao ensaio. O ensaio realizado baseia-se no procedimento de ensaio “*Résistance à l’abrasion*” (AAVV, 2000). O ensaio realizou-se nas meias lajetas quando estas tinham 1 ano e meio de idade, encontrando-se em ambiente condicionado a  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  de temperatura e  $65 \pm 5\%$  de humidade relativa antes da realização do ensaio. As meias lajetas foram transportadas, à vez, para o laboratório, que se encontrava a  $21^\circ\text{C}$  e 60% de humidade relativa, para serem ensaiadas, voltando posteriormente a ser colocadas em ambiente condicionado. Foram realizadas 3 escovagens em cada face das lajetas, lisa e rugosa, totalizando 6 análises nas 4 lajetas.

- **Material**

- Máquina de abrasão;
- Balança de precisão 0,1g;
- Ar comprimido.

- **Procedimento experimental**

- Pesou-se a lajeta;
- Colocou-se a lajeta debaixo da escova de abrasão;
- Ligou-se o ar comprimido;
- Realizaram-se 30 ciclos de escovagem, em que a contagem do ciclo é iniciada quando a escova passa num ponto, ficando este concluído quando esta torna a passar no mesmo ponto;
- Após a realização de 30 ciclos de escovagem na mesma zona, deslocou-se ligeiramente a lajeta e repetiram-se os 30 ciclos;
- Após ensaiadas 3 zonas do lado liso removeu-se o pó deixado pelo desgaste e pesou-se novamente a lajeta;
- Colocou-se a lajeta debaixo da escova de abrasão com o lado rugoso em contacto com a escova e repetiram-se os passos anteriormente descritos;
- Com os valores obtidos nas pesagens determinou-se o coeficiente de abrasão através da Equação 3.8 (AAVV, 2000):

$$C_a = \frac{S}{m_1 - m_2}$$

(Eq. 3.8)

Onde:

$C_a$  – coeficiente de abrasão [ $\text{cm}^2/\text{g}$ ]

$m_1$  – massa da lajeta antes do ensaio [g]

$m_2$  – massa da lajeta após o ensaio (3 áreas de desgaste)[g]

$S$  – área de desgaste [ $\text{cm}^2$ ]

No ensaio descrito pelo CRATerre (AAVV, 2000), são efetuados 60 ciclos em 1 minuto. No caso do ensaio realizado foi necessário alterar este fator por se ter verificado que, em especial no betão C, havia um desgaste rápido, fazendo com que a escova de abrasão ficasse imobilizada nos pequenos pedaços de brita. Optou-se então por limitar a 30 ciclos de forma a obter resultados mais comparáveis.



Fig. 3.35 – Máquina de desgaste



Fig. 3.36 – Escova de desgaste com os pesos

**Resultados obtidos no ensaio:**

No Quadro 3.14 encontram-se os valores das pesagens efetuadas ( $m_1$  e  $m_2$ ), a área de desgaste ( $S$ ) e o valor do coeficiente de abrasão. Todos os betões apresentam um coeficiente de abrasão ( $C_a$ ) maior na face lisa, o que faz com que esta seja a face que demonstra melhor comportamento ao desgaste mecânico.

Quadro 3.14 – Valores obtidos no ensaio de abrasão seca

	Lajeta	$m_1$ [g]	$m_2$ [g]	$S$ [cm <sup>2</sup> ]	$C_a$ [cm <sup>2</sup> /g]
Face Lisa	A	8878,5	8873,1	88,7	<b>49,26</b>
	B	9008,5	9003,0	88,0	<b>48,02</b>
	C	8205,5	8151,2	85,6	<b>3,15</b>
	P	16281,4	16278,0	94,2	<b>83,15</b>
Face Rugosa	A	8873,1	8865,8	88,7	<b>36,44</b>
	B	9003,0	8992,4	88,0	<b>24,92</b>
	C	8136,7	8060,4	85,6	<b>2,24</b>
	P	16278,0	16239,0	94,2	<b>7,25</b>

Entre os betões com terra, o betão A é aquele que apresenta o valor mais elevado de  $C_a$ , enquanto o betão C tem um valor bastante inferior. Estas diferenças podem ser notadas observando as Figuras 3.37 a) e 3.39 a), onde na primeira existe apenas um ligeiro desgaste superficial, revelando orifícios causados pela presença de bolhas de ar na altura da betonagem, enquanto na Figura 3.39 a) são bastante visíveis as marcas deixadas pela passagem da escova de abrasão que desgastou a pasta de cimento do betão, deixando à vista a brita. Comparando o betão A com o P, é este último que apresenta melhor comportamento, com um  $C_a$  bastante superior ao do betão A.

Analisando a face rugosa de todos os betões, é o A que apresenta um comportamento mais favorável, com o maior valor de  $C_a$ . Novamente é ao betão C que corresponde o valor mais baixo de  $C_a$ , sendo também visível na Figura 3.39 b) as marcas deixadas pela escova de abrasão na pasta de cimento, revelando a brita da mistura. Nesta face o betão P foi bastante afetado pela abrasão, como é visível na Figura 3.38 b), contrariando a tendência da face lisa.



Fig. 3.37 – Face lisa (a) e face rugosa (b) do betão A após o ensaio de abrasão

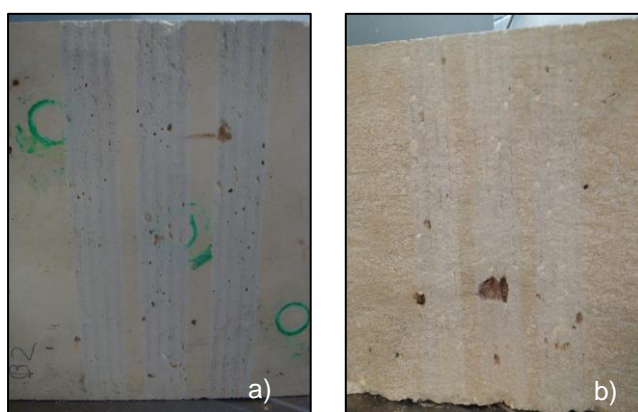


Fig. 3.38 – Face lisa (a) e face rugosa (b) do betão B após o ensaio de abrasão

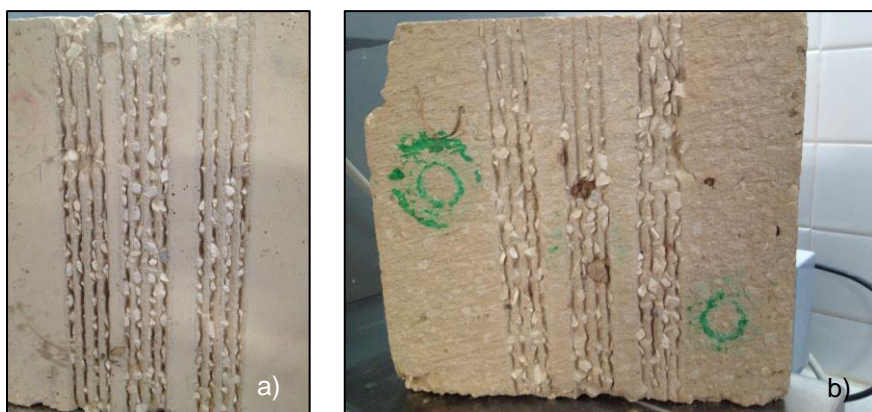


Fig. 3.39 – Face lisa (a) e face rugosa (b) do betão C após o ensaio de abrasão

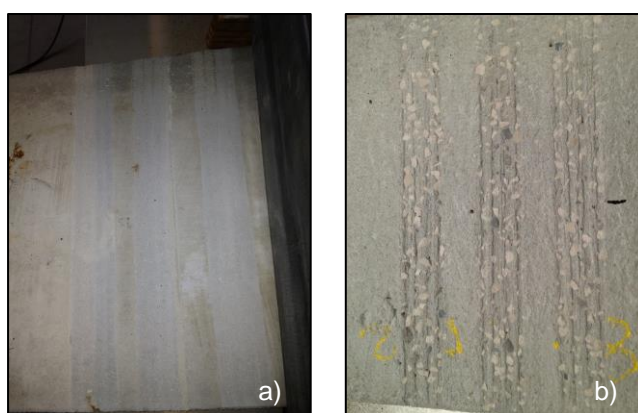


Fig. 3.40 – Face lisa (a) e face rugosa (b) do betão C após o ensaio de abrasão

### 3.13. Abrasão húmida

Para a realização deste ensaio foi desenvolvido um mecanismo, com o auxílio do Engenheiro Vitor Silva, nos laboratórios do DEC-FCT. O mecanismo desenvolvido e o procedimento utilizado tiveram como base o descrito no Bulletin 5 (Middleton, 1987). O mecanismo utiliza água com uma pressão de 0,5 bar, e é constituído por um manómetro de controlo de pressão (Figura 3.41 a)), uma ponteira de dispersão de água (Figura 3.41 b)) e uma tábua de proteção com um orifício com 10,5 cm de diâmetro interno (Figura 3.41 c)). As meias lajetas foram ensaiadas quando atingiram 1 ano e meio de idade. Encontravam-se em ambiente condicionado a  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$  de temperatura e  $65\pm 5\%$  de humidade relativa antes do início do ensaio, tendo sido transportadas para o local de ensaio, no exterior, na altura da sua realização, sendo posteriormente colocadas novamente em ambiente condicionado, após terminado o ensaio.

Foram analisadas duas lajetas de cada betão, tendo em cada uma delas sido ensaiada uma face diferente de maior dimensão (face lisa, que tinha estado em contacto com o molde, e face oposta, mais rugosa) realizando-se assim 2 ensaios por tipo de betão, num total de 8 ensaios.





Fig. 3.41 – Placa de proteção (a); Ponteira de dispersão (b); Manómetro com pressão de 0,5 bar (c)



Fig. 3.42 – Mecanismo em funcionamento

- **Material**

- Mecanismo de dispersão de água;
- Balança de precisão 0,1g.

- **Procedimento experimental**

- Pesou-se a lajeta;
- Colocou-se a lajeta no local de ensaio, com a maior face na vertical, a uma distância de 47 cm da ponteira de dispersão de água;
- Ligou-se a água com uma pressão de 50 kPa;
- Passados 15 minutos de ensaio, efetuou-se uma inspeção visual a fim de verificar a existência e respetiva medição da profundidade de perfuração, repetindo-se a cada 15 minutos de ensaio decorridos;
- Após 1 hora deu-se por terminado o ensaio.

**Resultados obtidos no ensaio:**

Após 1 hora de ensaio, e quatro análises visuais, não houve qualquer alteração nos betões A, B e P, em ambas as faces. No betão C a face lisa não apresentou alterações no final do ensaio, como

é visível na Figura 3.43. Na face rugosa observou-se o aparecimento de dois orifícios de 3,80 mm e 8,02 mm, como é visível na Figura 3.44. Estes não se encontravam na zona de impacto da água, podendo o seu aparecimento ser justificado com a presença de uma fissura na lajeta que, com a infiltração de água, fez com que se soltassem dois pedaços de brita.

As lajetas foram colocadas em ambiente condicionado para secarem, visto que não havia disponíveis estufas para realizar a secagem, devendo estas ser pesadas quando se encontrarem estabilizadas, de forma a avaliar a existência de perda de massa provocada pelo ensaio.

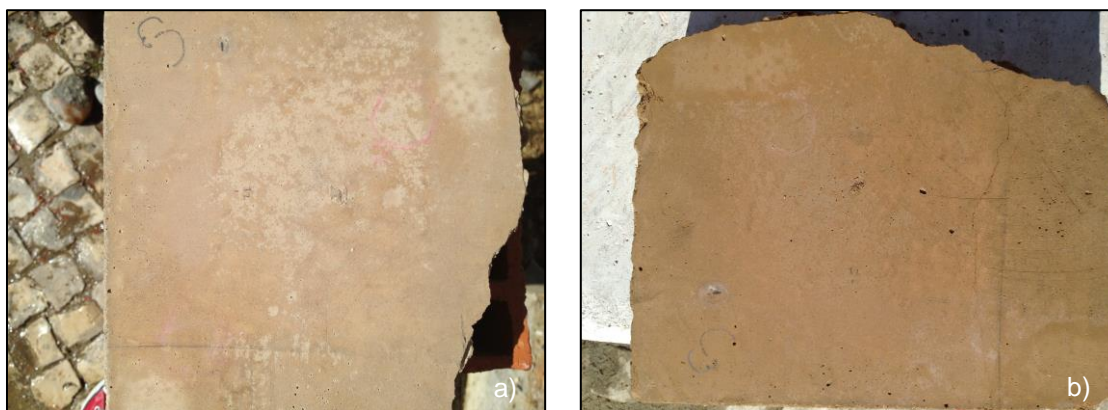


Fig. 3.43 – Face lisa de lajeta de betão C antes do ensaio (a); após o ensaio (b)



Fig. 3.44 – Face rugosa de betão C face rugosa após o ensaio



## 4. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

No presente capítulo analisam-se globalmente os resultados obtidos nos diversos ensaios efetuados às composições de betão estudadas e cujos procedimentos e resultados individuais foram apresentados no capítulo anterior. No Quadro 4.1 apresenta-se uma síntese global dos valores médios dos resultados experimentais obtidos, assim como os respetivos desvios padrão, para os betões A, B, C, P, Pa e P\*, em que estes dois últimos correspondem, respetivamente, ao betão padrão com uma malha metálica no seu interior ensaiado quanto à sua condutibilidade térmica, e aos provetes do betão P ensaiados, sem utilização de meia de proteção, no ensaio de porosidade aberta e massa volúmica aparente.

### 4.1. Comportamento à ação da água

O comportamento dos betões face à ação da água e da humidade foi estudado através dos ensaios de absorção de água sob baixa pressão, absorção de água por capilaridade e secagem. Idealmente, pretende-se que um betão absorva o menor volume água e que essa absorção ocorra lentamente, o que se traduz em: baixos valores de água absorvida e de coeficiente de absorção de água sob baixa pressão aos 60 minutos, relativamente ao ensaio de absorção de água sob baixa pressão; baixo valor assintótico e de coeficiente de capilaridade, no caso do ensaio de absorção de água por capilaridade. Por outro lado pretende-se que a secagem se inicie de forma rápida e contínua, o que implica um elevado valor de taxa de secagem e um baixo valor de índice de secagem.

Sabe-se que, em virtude da influência do tipo de material estudado, este comportamento encontra-se diretamente relacionado com a sua microestrutura interna, estudada neste trabalho através do ensaio de porosidade aberta.

Na Figura 4.1 são apresentados os valores de porosidade aberta, índice de secagem e valor assintótico dos quatro betões estudados. Relacionando o VA com o IS observa-se que o betão que apresenta menor VA é o que tem o maior IS, ou seja, absorve menor quantidade de água, mas também tem maior dificuldade em libertá-la. Tal pode ser explicado com os valores de porosidade aberta registados, em que o betão padrão apresenta o menor valor de  $P_{ab}$ . Entre os três betões com terra, os valores de VA e  $P_{ab}$  são bastante semelhantes, o que revela que a presença de maior ou menor quantidade de terra nos betões não se reflete diretamente nestes parâmetros. No entanto, tal não se verifica no IS, em que o betão C, apesar de não ser o que em termos absolutos apresenta maior percentagem de  $P_{ab}$  (o que em princípio facilitaria a evaporação de água), é o que apresenta o valor mais baixo de IS, sendo este praticamente metade do valor registado no betão A. É assim o que liberta toda a humidade com maior facilidade.

Na Figura 4.2 é possível observar os valores registados de coeficiente de capilaridade e de taxa de secagem. O betão C é o que apresenta valores mais elevados em ambos os casos, ou seja, é este o betão que inicialmente absorve água com maior rapidez, mas é também o que a liberta de forma mais rápida. Por outro lado, o betão padrão absorve mais lentamente a água, mas também apresenta mais dificuldade em perdê-la no processo de secagem.

Quadro 4.1 – Síntese de resultados dos ensaios realizados

Ensaio	Med e dp		A	B	C	P	Pa	P*
$\lambda$ [W/m.°C]	Med		1,32	1,43	1,14	2,10	2,07	-
	dp		0,08	0,08	0,07	0,10	0,05	-
Ed [N/mm <sup>2</sup> ]	v=0,2	Med	8074	8725	1795	17661	-	-
		dp	630	601	140	604	-	-
	v=0,3	Med	6664	7202	1482	14578	-	-
		dp	520	496	115	498	-	-
DS [escala de Vickers]	Face Lisa	Med	106,1	102,4	36,8	130,8	-	-
		dp	5,1	5,6	15,1	9,3	-	-
	Face Rugosa	Med	99,6	94,3	42,0	124,0	-	-
		dp	10,6	9,9	9,8	12,9	-	-
Água abs. sob baixa pressão [kg/(m <sup>2</sup> .h)]	Face Rugosa	Med	11,16	9,46	14,94	9,58	-	-
		dp	2,65	3,14	3,87	2,05	-	-
	Face Lisa	Med	5,26	8,93	24,66	3,18	-	-
		dp	4,05	0,15	3,63	1,22	-	-
Coef.de abs. de água aos 60 min. [kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> ]	Face Rugosa	Med	1,79	1,43	2,39	1,36	-	-
		dp	0,41	0,38	0,88	0,30	-	-
	Face Lisa	Med	1,44	1,54	3,28	0,44	-	-
		dp	0,34	0,28	0,08	0,23	-	-
VA [kg/m <sup>2</sup> ]	Med		12,36	11,15	11,76	8,58	-	-
	dp		1,70	0,36	0,26	0,04	-	-
CC [kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> ]	Med		0,69	0,69	1,25	0,60	-	-
	dp		0,01	0,06	0,10	0,08	-	-
IS [-]	Med		0,32	0,26	0,17	0,33	-	-
	dp		0,04	0,02	0,03	0,03	-	-
TS [kg/m <sup>2</sup> .h]	Med		0,09	0,10	0,11	0,07	-	-
	dp		0,02	0,00	0,01	0,00	-	-
R <sub>t</sub> [MPa]	Med		1,89	1,59	0,46	4,69	-	-
	dp		0,47	0,31	0,15	0,69	-	-
R <sub>c</sub> [MPa]	Med		8,01	7,05	2,22	16,18	-	-
	dp		1,43	1,68	0,40	2,26	-	-
R <sub>c</sub> após água [MPa]	Med		7,14	6,25	1,86	-	-	-
	dp		1,65	1,37	0,73	-	-	-
Pab [%]	Med		29,5	30,3	29,0	19,3	-	15,6
	dp		6,4	4,1	1,7	3,6	-	0,7
MV <sub>ap</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	Med		1735	1683	1732	1956	-	2131
	dp		221	128	80	97	-	17
C <sub>a</sub> [cm <sup>2</sup> /g]	Face Lisa		49,3	48,0	3,2	83,2	-	-
	Face Rugosa		36,4	24,9	2,2	7,3	-	-

$\lambda$  - condutibilidade térmica; Ed - módulo de elasticidade dinâmico; DS - dureza superficial; VA - valor assintótico;  
 CC - coeficiente de capilaridade; IS - índice de secagem; TS - taxa de secagem; R<sub>t</sub> - resistência à tração; R<sub>c</sub> -  
 resistência à compressão; Pab - Porosidade aberta; MV<sub>ap</sub> - massa volúmica aparente; C<sub>a</sub> - coeficiente de abrasão  
 A – traço 1:3:1 cim:solo:brita]; B – traço 1:3:2 [cim:solo:brita]; C – traço 1:6:4 [cim:solo:brita]; P – traço 1:2:2  
 [cim:areia:brita]; Pa – igual ao betão P, mas com malha metálica no interior; P\* - igual ao betão B, mas estudado  
 sem utilização de meia de proteção

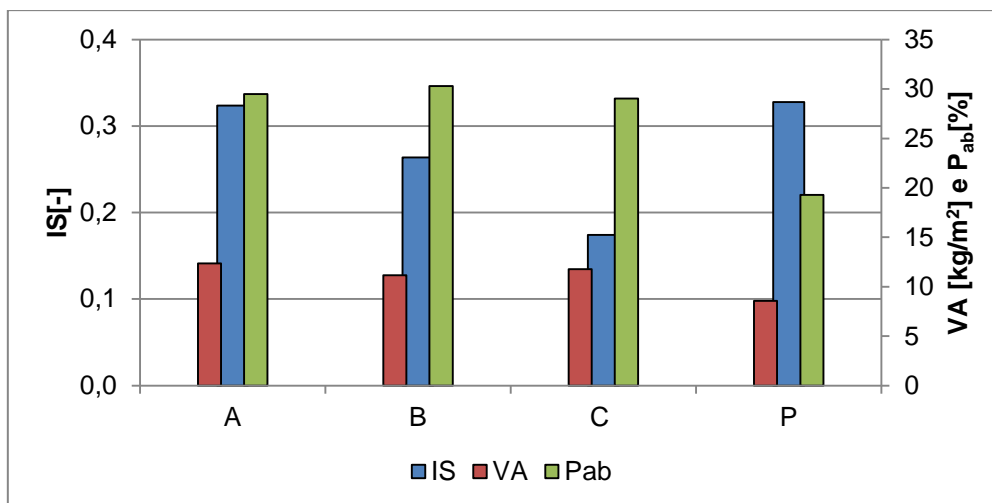


Fig. 4.1 – Índice de secagem, valor assintótico e porosidade aberta dos betões

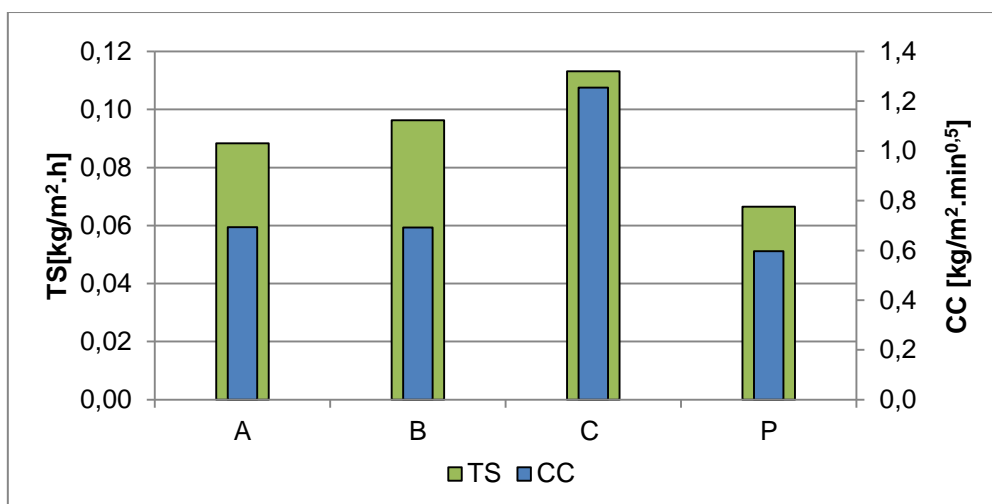


Fig. 4.2 – Taxa de secagem e coeficiente de capilaridade dos betões

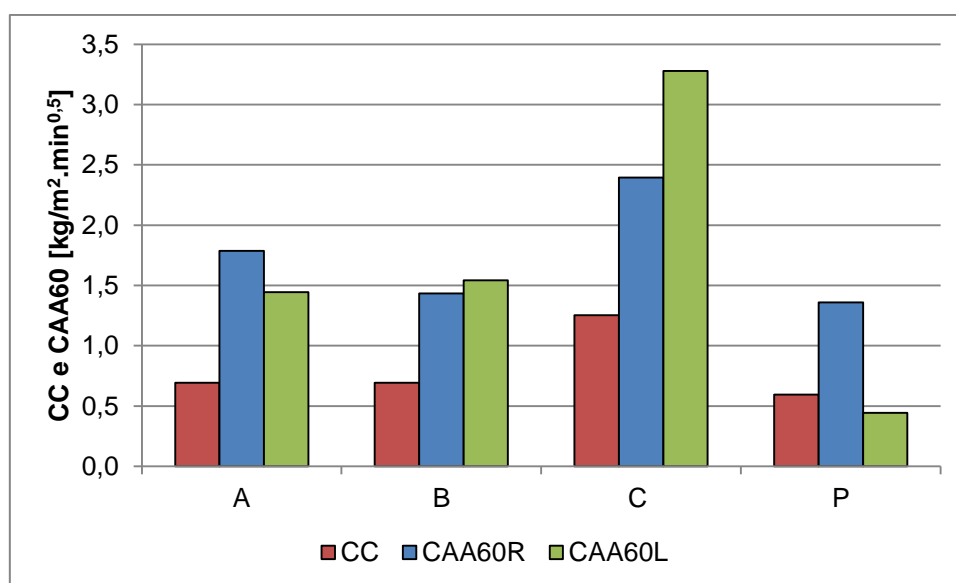


Fig. 4.3 – Coeficiente de capilaridade e coeficiente de absorção de água aos 60 minutos das faces lisas e rugosas dos betões

Já os betões A e B apresentam um valor semelhante de CC, sendo no entanto o valor de TS registado no betão B superior ao registado no betão A, algo que poderá ser justificado com a presença de maior quantidade de terra no betão, por vezes em aglomerados de grandes dimensões.

Na Figura 4.3 é possível relacionar os coeficientes de absorção de água aos 60 minutos (CAA60) em ambas as faces das lajetas de betão com o coeficiente de capilaridade. O betão C continua a apresentar os valores mais elevados de CAA60 em ambas as faces, o que se encontra de acordo com o valor de CC. Em relação aos betões A e B, ambos apresentam valores muito próximos de CAA60L, o que se mostra coerente com os valores de CC, que também são bastante próximos. Novamente, é o betão padrão que apresenta menores valores de CAA60L e CAA60R, estando também estes de acordo com o valor de CC. Como o ensaio de absorção de água sob baixa pressão tem a duração de 60 minutos, o valor de CC é um parâmetro que transmite o comportamento expectável do material, pois este indica a velocidade de absorção de água por capilaridade.

É possível afirmar que a presença de terra em maior quantidade nos betões apenas influencia a velocidade de absorção ou perda de água, não tendo um papel preponderante nos outros parâmetros estudados. O facto de existirem aglomerados de terra de grandes dimensões poderá ter também influenciado os valores de CC e TS. Entre as duas faces, a face lisa apresenta um comportamento mais vantajoso, por absorver menor quantidade de água, sendo esta a face que deverá preferencialmente contactar com o exterior.

## **4.2. Parâmetros mecânicos**

Nas Figuras 4.4 e 4.5 encontram-se reunidos os resultados dos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por flexão e de módulo de elasticidade dinâmico. O módulo de elasticidade dinâmico é tanto maior quanto menor a deformabilidade de um material. Analisando o módulo de elasticidade dinâmico dos betões estudados, verifica-se que o betão P apresenta o valor mais elevado, os betões A e B têm valores bastante próximos e o betão C um valor mais baixo que os restantes. Os betões A e B apresentam valores bastante próximos de resistência à tração e compressão; o betão P regista os valores mais elevados e o betão C os menores.

Na Figura 4.6 são apresentados os valores de dureza superficial na face lisa (DS(Lisa)) e na face rugosa (DS(Rug)) obtidos através do ensaio com o esclerómetro pendular, assim como os resultados do ensaio de resistência à compressão. Mais uma vez os resultados de DS apenas traduzem uma tendência relativamente ao comportamento dos betões quanto à resistência à compressão. O betão P apresenta maior dureza superficial e maior resistência à compressão; entre os betões com terra, o A é o que apresenta maior valor de DS, sendo este valor próximo do do betão B, e registando o betão C o menor valor. Este comportamento é acompanhado pelos valores da resistência à compressão.

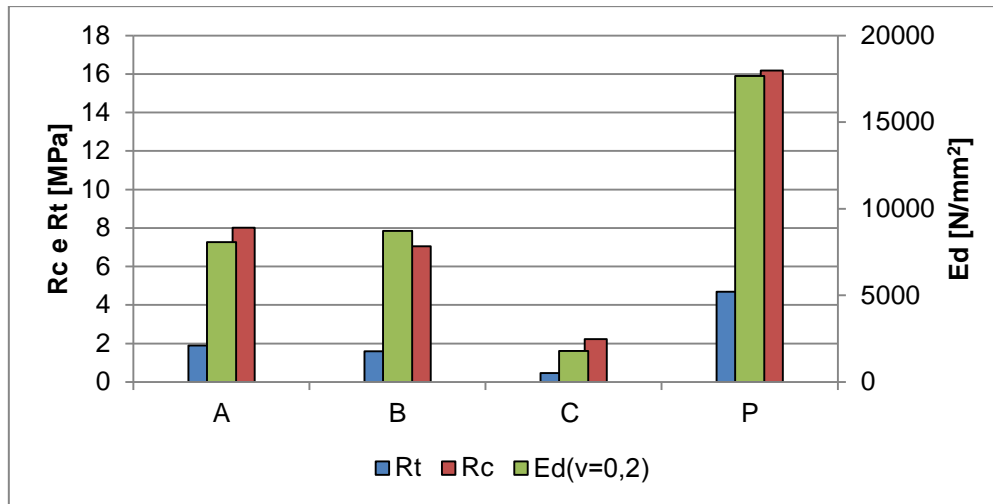
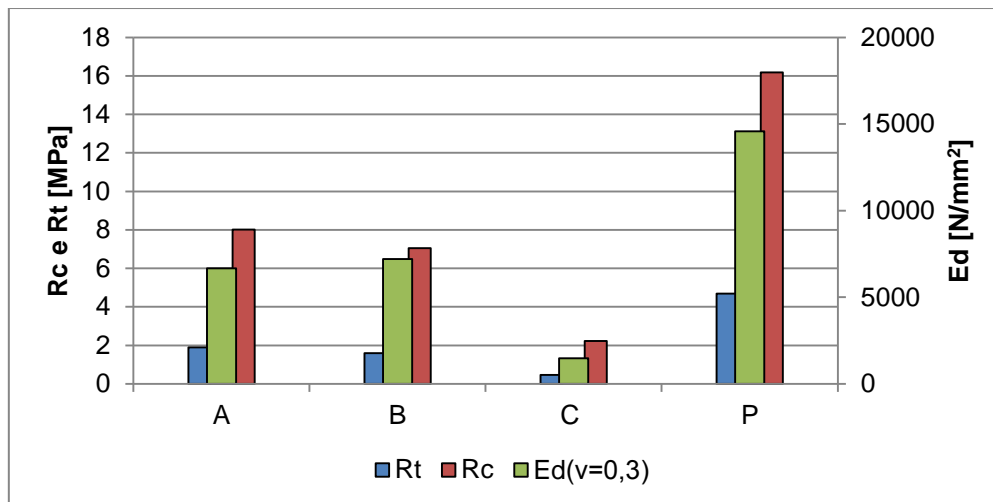
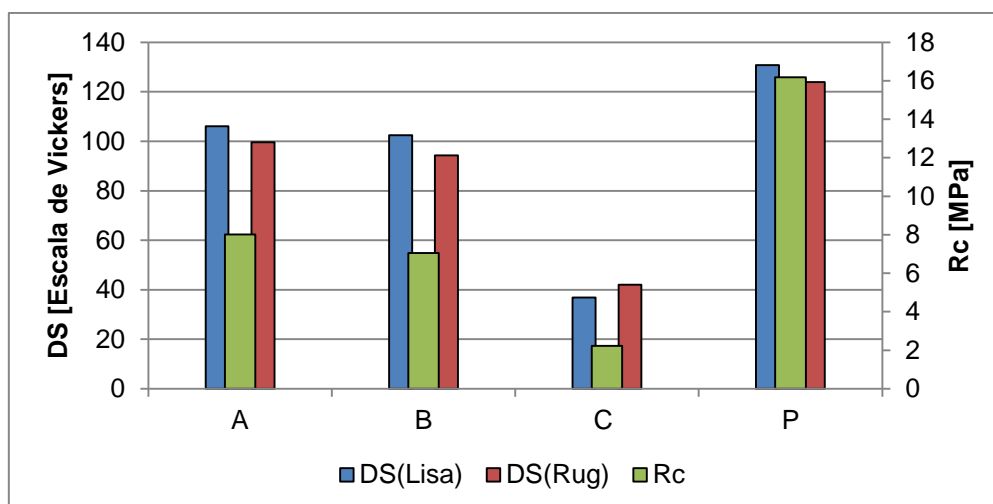
Fig. 4.4 – Módulo de elasticidade dinâmico ( $v=0,2$ ), resistência à tração e à compressão dos betõesFig. 4.5 – Módulo de elasticidade dinâmico ( $v=0,3$ ), resistência à tração e à compressão dos betões

Fig. 4.6 – Dureza superficial em ambas as faces das lajetas e resistência à compressão dos betões

Na Figura 4.7 é possível avaliar os valores do coeficiente de abrasão ( $C_a$ ) e a dureza superficial (DS) de ambas as faces dos betões. No caso dos betões com terra A e B, ambos têm maior DS na face lisa e é também nesta face que o  $C_a$  é mais elevado, ou seja, foi esta a face que apresentou menor deterioração. No betão C, a DS de ambas as faces é bastante próxima, sendo no entanto em termos absolutos o valor da face rugosa superior ao da face lisa; também o  $C_a$  é bastante semelhante em ambas as faces, contrariando os outros betões apresentando um valor inferior na face rugosa. No betão P destaca-se o valor  $C_a$  na face rugosa, que é muito baixo, havendo uma deterioração próxima da verificada no betão C. Tal pode indicar que a presença de irregularidades na superfície do betão tenha facilitado a deterioração pela escova.

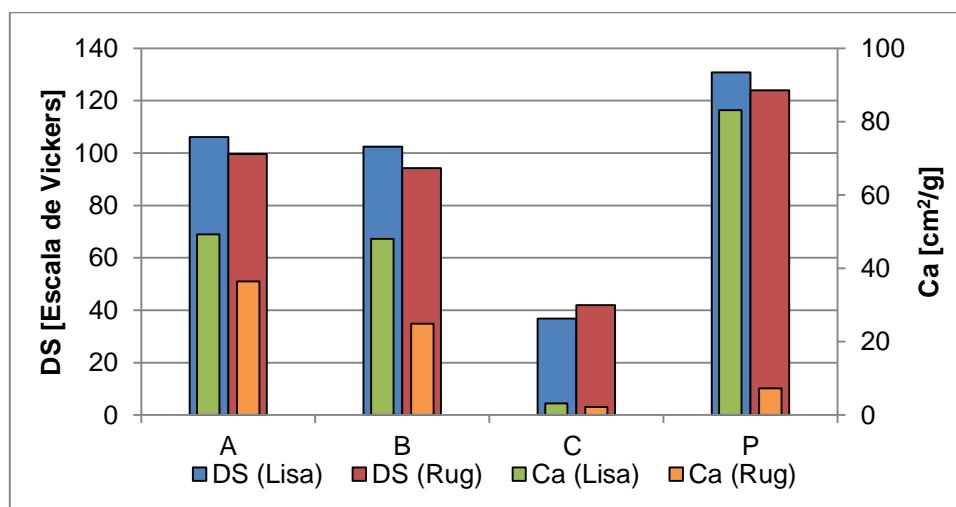


Fig. 4.7 – Dureza superficial e coeficiente de abrasão de ambas as faces dos betões

### 4.3. Resistências mecânicas e ao ataque por sulfatos

Comparando os resultados obtidos nos ensaios de resistências mecânicas e de resistência ao ataque por sulfatos, o betão C é o que apresenta menor resistência aos ciclos de contaminação, enquanto que, novamente, os betões A e B apresentam um comportamento bastante semelhante. Este comportamento mostra-se coerente com os valores de resistências mecânicas dos betões. Já o betão P, após 25 ciclos, teve uma perda de massa inferior a 10%, apresentando melhor comportamento que os restantes betões, já que é também este betão que regista resistências mecânicas mais elevadas. Foi também constatado que a sua resistência à compressão aumenta com o contacto com a água, apesar de não ter sido possível quantificar esse aumento.

Importa novamente mencionar o facto de, ao entrar em contacto com água, os grandes aglomerados de terra presentes nos provetes de betão com terra se terem dissolvido, havendo uma perda imediata de massa e fragilização dos provetes.

## 4.4. Comparação com resultados de outros autores

### 4.4.1. Comportamento mecânico

Comparando os resultados de resistência à compressão apresentados no Quadro 2.4 e 2.5 com os valores obtidos nos estudos realizados no âmbito desta dissertação, é possível afirmar que o betão com terra apresenta maior resistência à compressão que os adobes ensaiados por Coroadó *et al.* (2010) e a taipa ensaiada por Mateus (2005). Por outro lado os resultados obtidos por Guettala *et al.* (2006) em BTC mostram ser superiores a qualquer um dos obtidos em betão com terra, sendo cinco dos doze valores apresentados de resistência à compressão superiores aos do betão padrão.

### 4.4.2. Comportamento face à ação da água

Consultando o Quadro 2.6, que apresenta os resultados do estudo do comportamento face à ação da água em provetes cúbicos de taipa efetuado por Faria *et al.* (2012), e comparando-os com os valores obtidos nos betões com terra, observa-se que estes, CC, VA e IS; são sempre superiores nos provetes de taipa. Assim, pode afirmar-se que, inicialmente, os provetes de taipa absorvem mais rapidamente água e em maior quantidade, apresentam no entanto valores de índice de secagem superiores, o que demonstra uma maior dificuldade em perder a água absorvida em comparação com os betões com terra.

No Quadro 2.7 são apresentados os valores de CC em adobes obtidos por Coroadó *et al.* (2010). Novamente, os valores são bastante superiores aos registados nos betões com terra, o que mostra que, a longo prazo, o betão com terra tem mais facilidade em perder a água absorvida.

Já os resultados de CC apresentados no Quadro 2.8 de um estudo realizado por Bahar *et al.* (2004) em BTC encontram-se traduzidos em termos percentuais, sem que seja explicitado o procedimento utilizado no tratamento de dados, tornando assim impossível a comparação de resultados.

Os resultados do estudo efetuado por Chew (2012), em BTC, sobre a absorção de água sob baixa pressão utilizando tubos de Karsten, mostram-se superiores aos obtidos em qualquer uma das faces estudadas do betão com terra, em que o maior valor da velocidade de absorção de água registado foi de 0,17 ml/min. na face lisa do betão C.

Globalmente, é possível afirmar que o betão com terra apresenta um melhor comportamento que os outros materiais com terra analisados, no que ao comportamento face à água diz respeito.

### 4.4.3. Comportamento térmico

Analisando o Quadro 2.9, que compila os resultados obtidos em provetes de taipa realizados por Faria *et al.* (2012) e por Pereira (2013), em provetes de taipa, verifica-se que estes apresentam valores inferiores aos obtidos no presente estudo, o que mostra que o betão com terra, apesar de exibir melhor comportamento térmico que o betão corrente, perde mais energia sob a forma de calor, em comparação com a taipa.





## 5. CONCLUSÕES

### 5.1. Conclusões finais

Esta dissertação iniciou-se com uma breve exposição teórica sobre a utilização do betão como material de construção, a utilização de terra na construção e a sua situação atual, seguida por uma pesquisa de soluções construtivas que utilizam simultaneamente terra e cimento. Foi ainda feita uma breve análise sobre ensaios usados para definir o comportamento mecânico, avaliar o comportamento face à ação da água e o comportamento térmico. O trabalho experimental desenvolvido foi maioritariamente baseado em normas europeias, embora não especificamente definidas para este tipo de material. Sempre que necessário recorreu-se a documentos e especificações que permitissem desenvolver ou adaptar procedimentos de ensaio.

O estudo desenvolvido, que se encontra inserido no projeto QREN nº 2011/021586 - Parede Ecoestrutural, desenvolvido em co-promoção entre a empresa ESLAM - Estruturas Laminares Engenharia, Lda. e a Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, teve como principal objetivo caracterizar provetes laminares de betão que utilizam terra como substituto parcial de agregado, avaliando a influência da variação do traço ligante:agregado, assim como da proporção brita:solo através da comparação com um betão de agregados comuns, correntemente utilizado pela empresa.

Finalizada a dissertação, considera-se que os objetivos iniciais foram cumpridos e, nalguns aspetos, até excedidos. Como exemplo, foi possível desenvolver procedimentos de ensaio e equipamentos que já estão atualmente a ser utilizados no âmbito da caracterização de blocos de terra comprimida e outros materiais similares, contribuindo para que o DEC possa apresentar valências laboratoriais mais avançadas.

Fazendo uma avaliação global dos três betões com terra estudados, e embora as suas características mecânicas possam ainda ser validadas através de ensaios a realizar em provetes cilíndricos (Brito, em curso), é possível afirmar que os betões A e B indiciam ter condições para poderem ser utilizados em construções de edifícios de pequeno porte, apresentando valores de resistência mecânica bastante próximos, inferiores aos obtidos no betão padrão, mas superiores aos de soluções construtivas que utilizam terra.

É de salientar que a utilização do esclerómetro pendular indicia de forma bastante aproximada as resistências deste tipo de betões, o que abre possibilidades para a fácil avaliação in situ e de forma não destrutiva.

No que ao comportamento térmico diz respeito, o betão C é aquele que apresenta melhor eficiência. Apesar de superiores ao betão C, os valores de condutibilidade térmica dos betões A e B são inferiores ao do betão padrão, o que atesta a maior eficiência dos betões com terra, relativamente ao betão corrente.

Em relação ao comportamento da superfície dos betões com terra, os betões A e B demonstram ter um comportamento mais favorável que o betão C, apresentando respetivamente um

valor de dureza superficial bastante próximo entre si e superior relativamente ao betão C. Os betões A e B apresentam ainda um desgaste superficial a seco bastante inferior ao verificado no betão C.

Relativamente ao comportamento face à água, importa dividi-lo em duas fases: a absorção de água e a libertação da água absorvida. No que à absorção de água diz respeito, esta foi definida através do coeficiente de capilaridade e valor assintótico, obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade, e ainda através da quantidade de água absorvida sob baixa pressão, durante uma hora de ensaio com tubos de Karsten. Em termos de valor assintótico, que indica a quantidade de água absorvida por capilaridade, num ensaio que teve 23 horas de duração, o betão com terra que absorve menor quantidade de água é o betão B, sendo o betão A o que absorve maior quantidade, não havendo uma diferença significativa entre os 3 betões. Em relação ao coeficiente de absorção capilar, que indica a maior ou menor velocidade inicial de absorção de água dos betões, regista-se o mesmo valor para os betões A e B, apresentando o betão C um valor que ascende a aproximadamente o dobro deste. Estes valores de CC fazem antever, de certa forma, o comportamento dos betões quando é estudada a sua capacidade de absorção de água sob baixa pressão, num ensaio que tem apenas uma hora de duração. Assim, fazendo uma distinção entre faces, a face lisa é a que permite menor absorção de água, o que faz com que, não havendo qualquer outro tipo de proteção face à ação da chuva, seja esta que fique preferencialmente exposta ao seu efeito. Nesta face, o betão A é o que apresenta melhor comportamento, seguido pelo betão B, com um valor bastante próximo do primeiro. Foi realizado ainda um ensaio que envolveu absorção de água - apesar deste não ter sido o parâmetro analisado - em que se avaliou o desgaste realizado pela ação da água em pressão, não havendo deterioração dos betões com terra. Em suma, dos betões com terra, considera-se que o betão B é o que apresenta comportamento mais satisfatório relativamente à absorção de água, não sendo este, no entanto, melhor que o betão P. Em relação à capacidade de perda da água absorvida esta foi determinada através do índice de secagem e da taxa de secagem. Em termos de índice de secagem, que reflete o comportamento de secagem a longo prazo, o betão C leva vantagem comparativamente aos outros betões com terra, em que o betão A apresenta um valor bastante próximo do betão P. Também na taxa de secagem, que indica a velocidade inicial de perda de água, é o betão C que apresenta melhor comportamento, apesar de os três betões apresentarem valores próximos.

Importa referir que a utilização de tubos de Karsten indicia fornecer uma estimativa bastante aproximada do comportamento da absorção capilar deste tipo de betões, o que abre possibilidades para a fácil avaliação in situ e de forma não destrutiva.

Após o contacto dos betões com a água, voltaram a ser determinadas as resistências à compressão dos betões com terra, tendo sido verificada uma diminuição.

Fazendo uma análise global dos parâmetros acima mencionados, o betão B aparenta ser o mais vantajoso dos betões com terra analisados. É vantajoso que painéis deste betão sejam aplicados com a face lisa em contacto com o exterior. Como no âmbito do projeto Parede Ecoestrutural se pretende otimizar a espessura dos painéis, estes serão complementados em obra pela execução de uma alvenaria adjacente. Pode ser equacionada uma de alvenaria de BTC, visto

tratar-se de uma técnica bastante disseminada, que não implica uma mão-de-obra muito especializada, e que prova ser bastante eficiente e sustentável.

Parte dos resultados desta dissertação foram já publicados em artigo de congresso internacional que se apresenta em anexo (Faria et al 2013), do qual a signatária procedeu à respetiva apresentação oral. A dissertação fará parte do relatório do projeto financiado pelo QREN Parede Ecoestrutural.

## 5.2. Desenvolvimentos futuros

Após finalizado este trabalho de caracterização de betões com terra, fica presente a necessidade de aprofundamento dos conhecimentos relativos a este tipo de material. Para tal considera-se relevante a realização de estudos que permitam:

- determinar a mistura ótima ligante:agregado, assim como de brita:solo, que apresente o melhor comportamento físico e mecânico, mantendo os objetivos de sustentabilidade e de redução de custo de produção;
- otimizar as características deste tipo de betão através do estudo de diferentes tipos de solos;
- melhorar o método utilizado na mistura do solo com os agregados de forma a obter misturas mais homogêneas, diminuindo a presença e dimensão dos aglomerados de terra;
- obter experimentalmente o valor do coeficiente de Poisson deste material;
- encontrar o método mais adequado para avaliar a resistência à ação de sais solúveis e particularmente a cloretos;
- uma avaliação mais abrangente da microestrutura porosimétrica dos betões;
- avaliar a eficiência deste tipo de betão como material de construção comparativamente a betões com incorporação de resíduos;
- estudar este material com a introdução de uma malha metálica que potencie o seu comportamento à tração.



## BIBLIOGRAFIA

- Portland Cement Association (2013). Retrieved from [http://www.cement.org/pavements/pv\\_sc.asp](http://www.cement.org/pavements/pv_sc.asp)
- AAVV (2000). *Guide: Blocs de Terre Comprimée- procédures d'essais: Résistance à L'Abrasion*. Bruxelles: CRATerre; Centre pour le Développement de l'Entreprise ACP; ENTPE.
- ACI Committee 122 (2002). *ACI 122R-02: Guide to Thermal Properties of Concrete and Masonry Systems*. Detroit.
- ACI Committee 201 (2008). *ACI 201.2R-08: Guide to Durable Concrete*. Detroit.
- ACI Committee 228 (2003). *ACI 228.1R-03: In-Place Methods to Estimate Concrete*. Detroit.
- AENOR (2008). *UNE 41410:2008 - Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques- Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo*.
- Appleton, J. (n.d.). *Construções em Betão- Nota histórica sobre a sua evolução*. IST-Lisboa.
- ASTM (1996). *D559-96: Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Muxtures*. Philadelphia.
- ASTM (2011). *D2487-11 - Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system)*. United States.
- Azevedo, H. (2010) *Reforço de estruturas de alvenaria de pedra, taipa e adobe com elementos de madeira*. Porto: FEUP.
- Bahar, R., Benazzoug, M., & Kenai, S. (2004). Performance of compacted cement-stabilised soil. *Cement & Concrete Composites*, 26, 811-820.
- Bestraten, S., Hormías, E., & Altemir, A. (2011). Construcción con tierra en el siglo XXI. *Informes de la Construcción*, 63(523), 5-20.
- Brito, J. (em curso). *Caracterização de betão com terra através de provetes cilíndricos*. Caparica: Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - FCT-UNL.
- Brito, V., Gonçalves, T. D., & Faria, P. (2011). Coatings applied on damp building substrates: performance and influence on moisture transport. *Journal of Coatings Technology and Research*, 8 (4), 513-525.
- Bruno, P. (2001). *A Fortaleza de Juromenha: contributo para o estudo e conservação da muralha islâmica de taipa militar*. Dissertação de Mestrado: Universidade de Évora.
- BSI (1986). *BS 1881:Part 203-Testing concrete- Part 203: Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete*. London.
- Bungey, J. H., Milard, S. G., & Grantham, M. G. (2006). *Testing og Concrete in Structures* (4th ed.). Abingdon: Taylor & Francis.
- CEN (1999). *EN 1015-11 - Methods of test for mortars for masonry. Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*. Brussels.
- CEN (2001). *EN 12504-2 - Testing concrete in structures - Part 2: Non-destructive testining - Determination of rebound number*. Brussels.
- CEN (2002). *EN 1015-18 - Methods of test for mortar for masonry- Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar*. Brussels.

- CEN (2004). *EN 12504-4 - Testing concrete - Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity*. Brussels.
- CEN (2009). *EN 15801 - Conservation of cultural property - Test methods - Determination of absorption by capillarity*. Brussels.
- Chew, J. (2012). *A critical analysis of waterproofing Compressed Earth Blocks*. Dissertation: Southampton Solent University.
- CNR/ICR (1991). *Normal 29/88 - Misura dell'indice di asciugamento (drying index)*. Roma.
- Coroado, J., Paiva, H., Velosa, A., & Ferreira, V. (2010). Characterization of renders, joint mortars and adobes from traditional constructions in Aveiro (Portugal). *International Journal of Architectural Heritage*, 4, 102-114.
- Coutinho, A. S. (1988). *"Fabrico e Propriedades do Betão"* (2ª ed., Vol. 1). Lisboa: LNEC.
- CRATerre, CDE, ENTPE (2000). *Blocs de Terre Comprimée- procédures d'essais: Résistance à L'Abrasion*. Bruxelles.
- Dias, J. (2012). *Tratamento de solos com cimento para obtenção de melhores características mecânicas*. Caparica: Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - FCT-UNL.
- Faria, P. (2004). *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas. Contribuição para o estudo da influência dos ligantes*. Lisboa: Tese de Doutoramento em Engenharia Civil - Reabilitação do Património Edificado - Universidade Nova de Lisboa.
- Faria, P. (2009). Resistance to salts of lime and pozzolan mortars. *RILEM Proceedings pro 067- Repair Mortars for Historic Masonry*, 99-110.
- Faria, P., Silva, V., Abreu, C., & Pereira, C. (2013). Caracterização de betão com terra para aplicação em construção modular prefabricada. 2º CIHEL.LNEC:Lisboa.(cd-rom)
- Faria, P., Silva, V., Pereira, C., & Rocha, M. (2012). The monitoring of rammed earth experimental walls and characterization of rammed earth samples. *Rammed Earth Conservation*, 91-97.
- Fernandes, M. (2006). Técnicas de construção em terra. *Terra: Forma de Construir. Arquitectura. Antropologia. Arqueologia - 10ª Mesa Redonda de Primavera*, 20-25. Porto: Argumentum.
- Flores-Colen, I. (2009). *Metodologia de avaliação do desempenho em serviço de fachadas rebocadas na óptica da manutenção preventiva*. Lisboa: Tese de Doutoramento em Engenharia Civil - Instituto Superior Técnico.
- Foppa, D. (2005). *Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Gomes, M., Gonçalves, T., & Faria, P. (2012). Unstabilised rammed earth: characterization of material collected from old constructions in south Portugal and comparison to normative requirements. *International Journal of Architectural Heritage*, pp. online 23 April 2012, doi/abs/10.1080/15583058.2012.683133.
- Gonçalves, T. D., & Gomes, M. I. (2012). Construção de terra crua: Potencialidades e questões em aberto. *Jornadas LNEC: engenharia para a sociedade, investigação e inovação, cidades e desenvolvimento*. LNEC:Lisboa.
- Guettala, A., Abibsi, A., & Houari, H. (2006). Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure. *Construction and Building Materials*, 20, 119-127.

- Guillaud, H. (2012). "Pisé": Evolution, innovations, resistances and futures directions. *RESTapia 2012 - Rammed Earth Conservation*. Taylor & Francis Group, London, UK.(cd-rom)
- Heathcote, K. (2002). *An investigation into the erodibility of earth wall units*. University of Technology Sydney.
- Hendrickx, R. (2012). Using the Karsten tube to estimate water transport parameters of porous building materials. *Materials and Structures*, pp. online 22 November 2012 - doi 10.1617/s11527-012-9975-2.
- Henriques, F. (1996, Maio). *Pedras naturais e artificiais. Determinação da porosidade aberta*. Caparica: DEC - FCT-UNL.
- Houben, H., & Guillaud, H. (1994). *Earth construction: a comprehensive guide*. London: ITDG Publishing.
- IGPAI (1970). *NP 143:1969 - Solos - Determinação dos limites de consistência*.
- IPQ (2007). *NP EN 206-1:2007 - Betão - Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade*. Caparica.
- IPQ (2008). *NP EN 1936:2008- Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volumicas real e aparente e das porosidades total e aberta*. Caparica.
- Kharchi, F., & Chaibeddra, S. (2012). *Earth Stabilized Concrete Durability. 6th International Symposium on Advances in Science and Technology, cd-rom*. Kuala Lumpur.
- Klieger, P., & Lamond, J. (1994). *Properties of Concrete and Concrete-Making Materials* (4 th ed.). Philadelphia: ASTM.
- LNEC (1966a). *Especificação LNEC E195:1966 - Solo - Preparação por via seca de amostras para ensaios de identificação*. Lisboa.
- LNEC (1966b). *Especificação LNEC E196:1966 - Solos - Análise granulométrica*. Lisboa.
- LNEC (1967). *Especificação LNEC E197- Solos - Ensaio de compactação*. Lisboa.
- LNEC (1970). *Especificação LNEC E 239:1970 - Solos - Análise granulométrica por peneiração húmida*. Lisboa.
- Malanho, S., & Veiga, R. (2010). *Análise do comportamento mecânico em laboratório e in situ de revestimentos pré-doseados de cimento*. LNEC:Lisboa: APFAC.
- Malhotra, V., & Carino, N. (2003). *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete* (2nd ed.). Taylor & Francis.
- Mateus, L. (2005). *Caracterização de Revestimentos Usados em Construções de Taipa no Barlavento Algarvio*. Lisboa: Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil- Instituto Superior Técnico.
- Mendes, N. (2012). *Avaliação do ensaio de pull-out na estimativa da resistência à compressão do betão em idades jovens*. Caparica: Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - FCT-UNL.
- Middleton, G. (1987). *CSIRO5-Bulletin 5: Earth-Wall Construction* (Fourth ed.). Australia: National Building Technology Centre.
- Minke, G. (2006). *Building with earth: design and technology of a sustainable architecture*. Basel-Switzerland: Birkhäuser.

- Morel, J., Aubert, J., Millogo, Y., Hamard, E., & Fabbri, A. (2013). Some observations about the paper “Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction” by F. Pacheco-Torgal and S. Jalali. *Construction and Building Materials*, 44, 419-421.
- Nepomuceno, M. (1999). *Ensaaios não destrutivos em Betão*. Covilhã: Trabalho de síntese.
- Neves, C. (2005). O uso do solo-cimento em edificações. A experiência do CEPED. V SIACOT - *Seminário Ibero-Americano de Construção com Terra*. Mendoza, Argentina.(cd-rom)
- Neves, C., Faria, O., Rotondaro, R., Cevallos, P., & Hoffmann, M. (2005). Seleção de solos e métodos de controle em construção com terra - práticas de campo. IV SIACOT - *Seminário Ibero-Americano de Construção com Terra*. Monsaraz, Portugal.(cd-rom)
- Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2012). Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. *Construction and Building Materials*, 29, 512-519.
- Pereira, J. P. (2013). *Análise do comportamento térmico de paredes de taipa*. Évora: Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Universidade de Évora.
- PROCEQ (2010). *Instruções de operação- Instrumento ultrassônico*. Schwerzenbach.
- QLC (1999). *Sulphate Attack and Chloride Ion Penetration: Their Role in Concrete Durability*. Australia: QLC Grup Technical Note.
- Rato, V. (2006). *Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas*. Universidade Nova de Lisboa,Lisboa: Tese de Doutoramento em Engenharia Civil - Reabilitação do Património Edificado.
- RILEM (1980a). *Water absorption under low pressure (pipe method)*. Test nº.II.4. Paris.
- RILEM (1980b). *Evaporation curve*. Test nº.II.5. Paris.
- Santos, C., & Matias, L. (2006). *ITE 50 - Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios*. Lisboa: LNEC.
- Toirac-Corral, J. (2008). El suelo-cimento como material de construcción. *Ciencia y Sociedad*, 33(4), 520-571.
- Villamizar, M., Araque, V., Reyes, C., & Silva, R. (2012). Effect of the addition of coal-ash and cassava peels on the engineering properties of compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*, 36, 276-286.
- Walker, P., & Standards Australia. (2002). *HB 195-2002:Australian Earth Building Handbook*. Sydney: Standards Australia International Ltd.
- Yilmaz, M., & Tugrul, A. (2012). The effects of different sandstone aggregates on concrete strength. *Construction and Building Materials*, 35, 294-303.



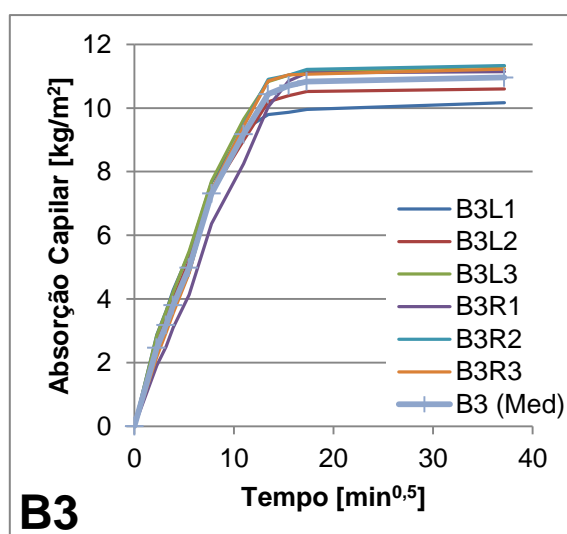
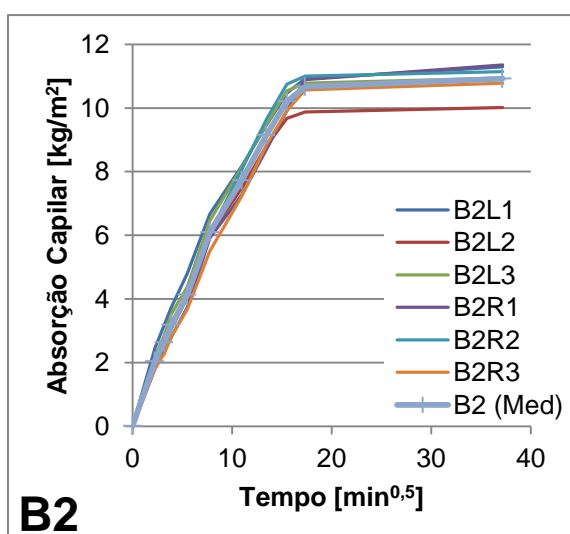
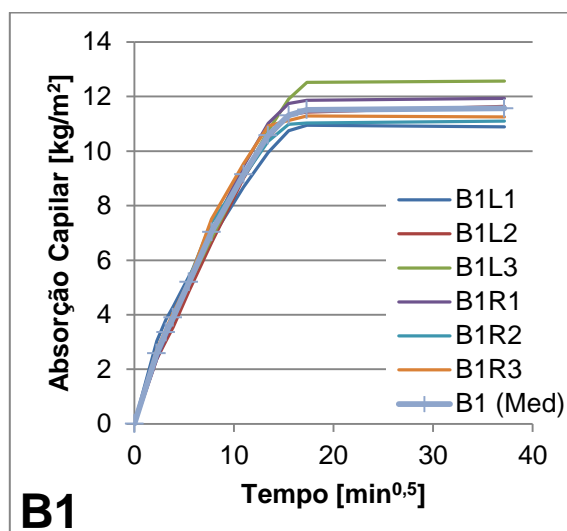
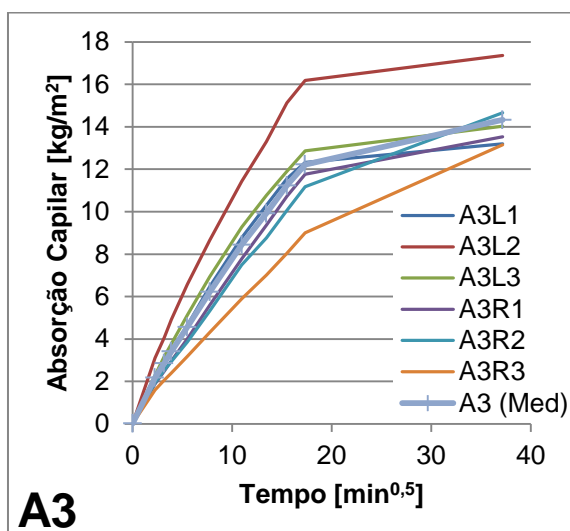
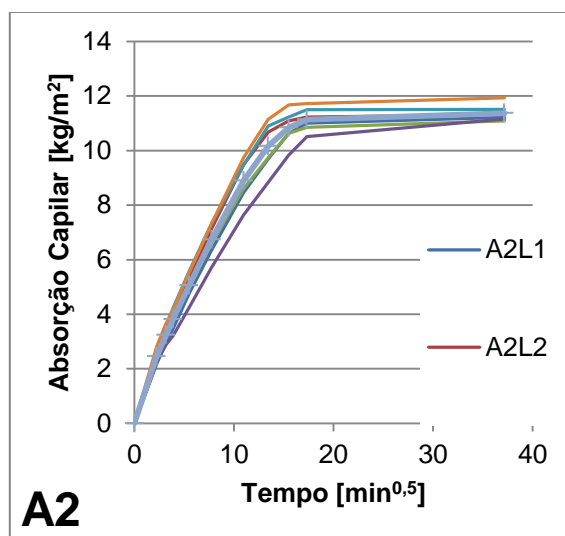
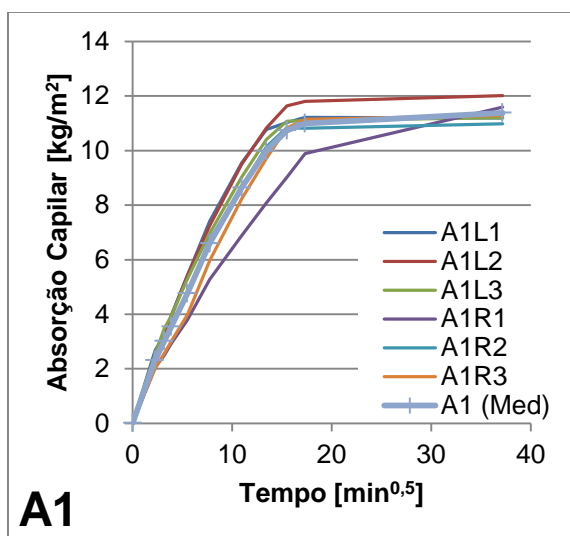
## **ANEXOS**

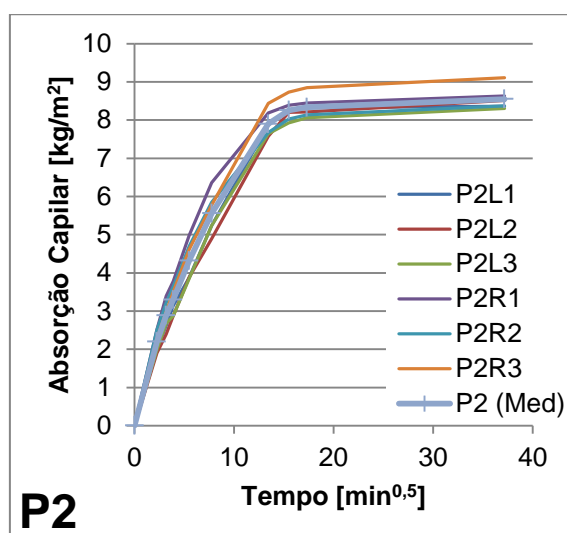
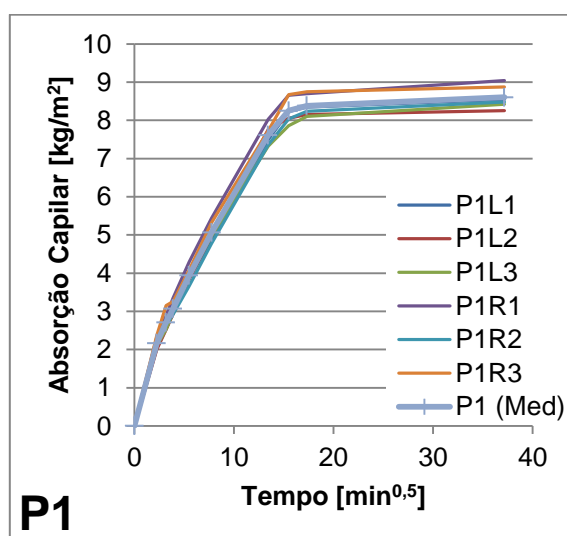
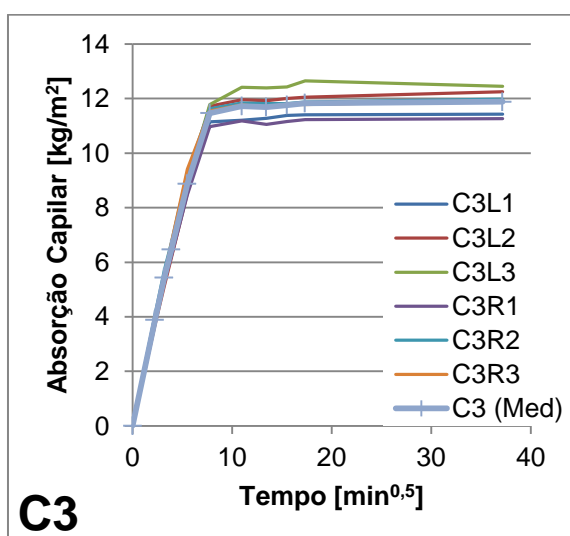
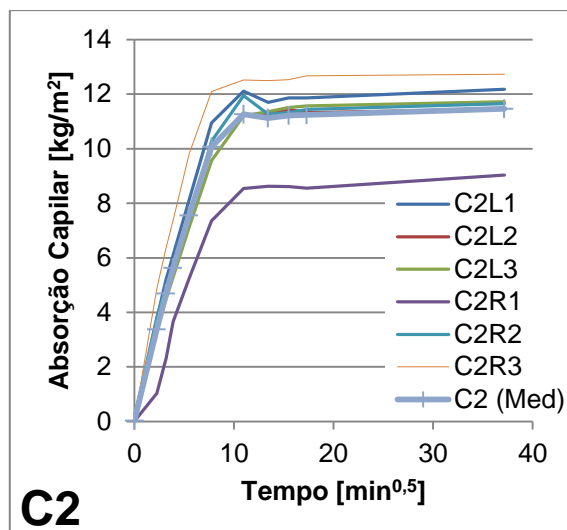
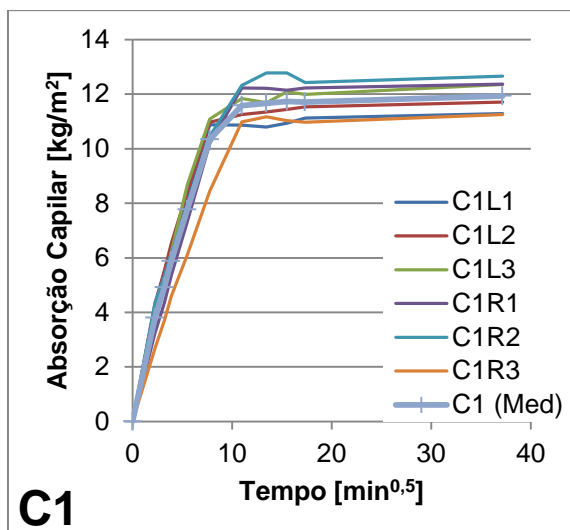


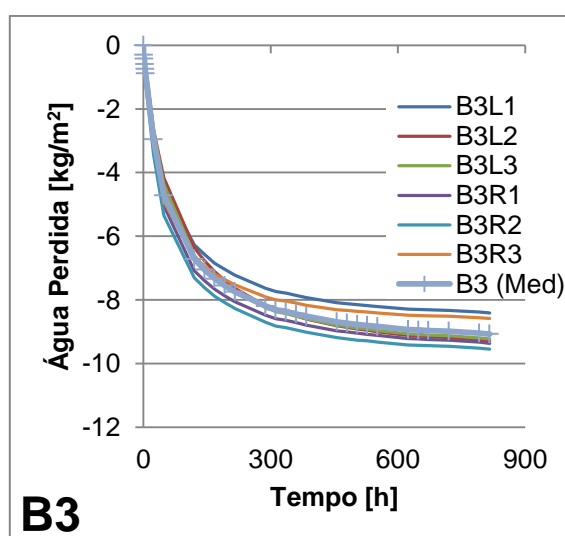
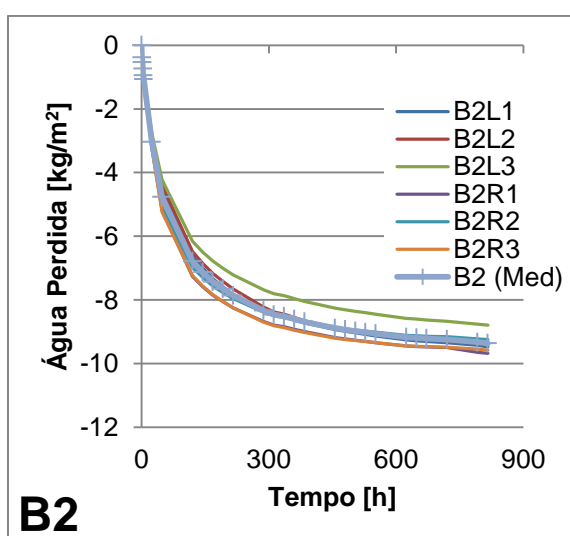
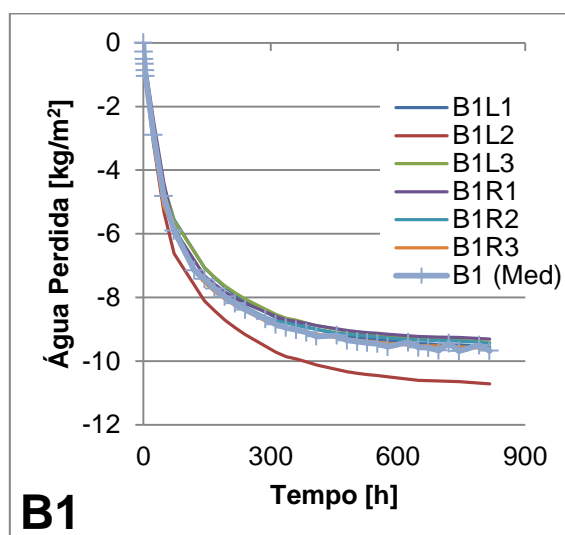
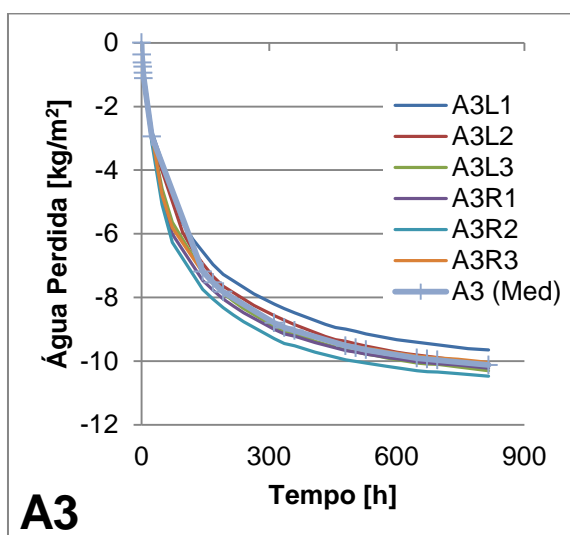
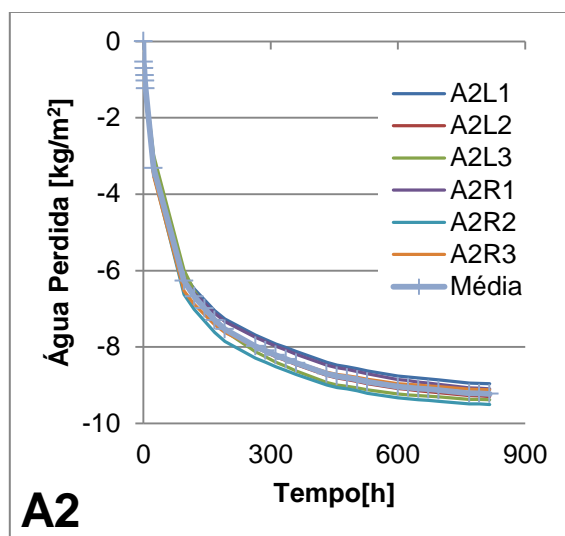
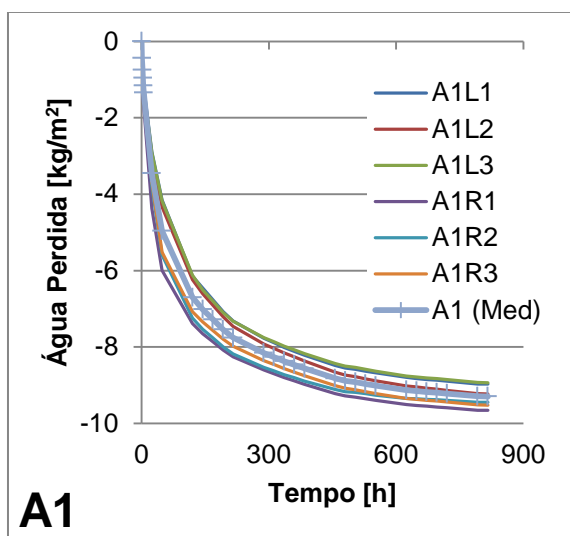
## Anexo I – Resultados individuais dos ensaios de resistências mecânicas

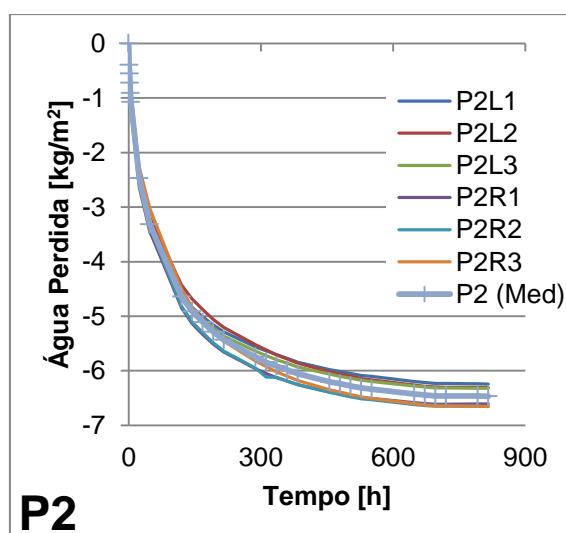
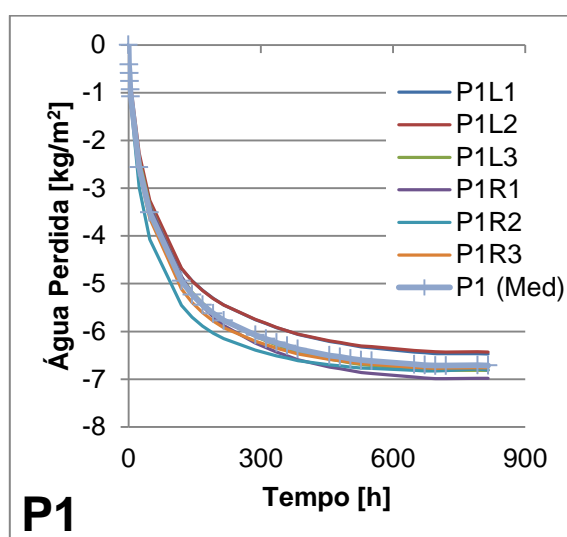
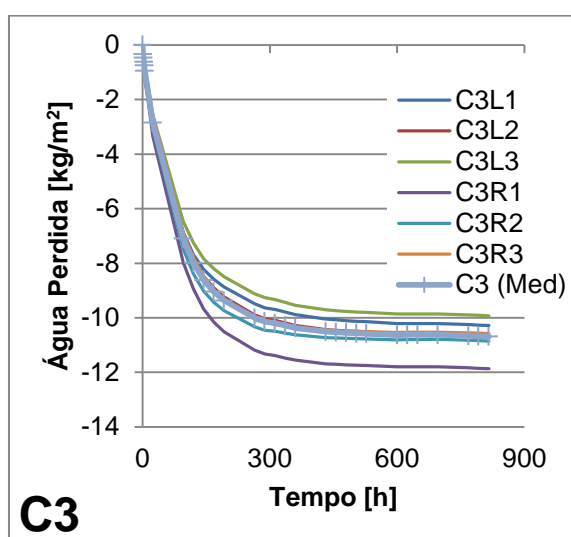
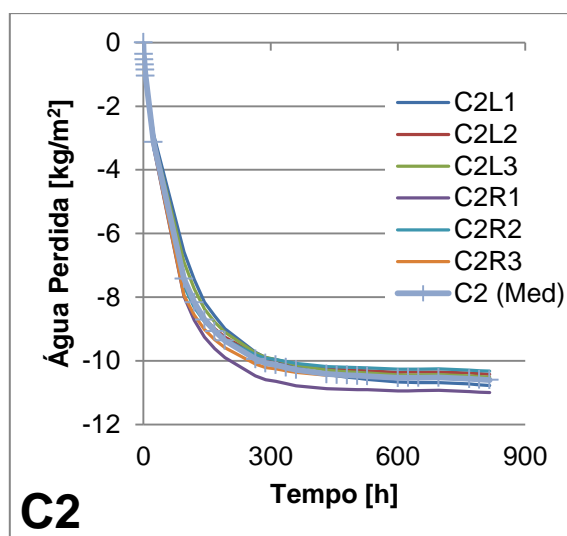
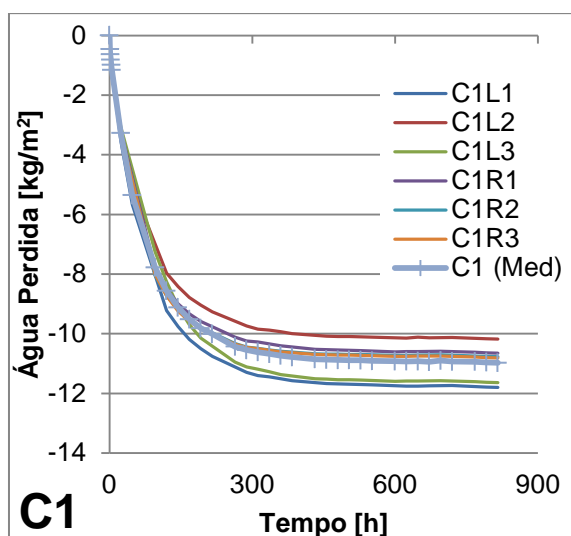
Lajeta	Provete	F <sub>t</sub> [N]	R <sub>t</sub> [MPa]	F <sub>c</sub> [N]	R <sub>c</sub> [MPa]
A1	M1	1458,02	1,75	22089,87	8,84
	M2	1223,34	1,47	16472,04	6,59
	M3	2194,04	2,63	13828,65	5,53
A2	M1	936,50	1,12	19098,06	7,64
	M2	1264,84	1,52	16897,20	6,76
	M3	1588,40	1,91	22569,37	9,03
A3	M1	1821,97	2,19	23399,52	9,36
	M2	1885,06	2,26	23657,76	9,46
	M3	1799,82	2,16	22264,64	8,91
B1	M1	1061,27	1,27	14622,67	5,85
	M2	1185,48	1,42	14047,95	5,62
	M3	1544,10	1,85	12714,77	5,09
B2	M1	1285,02	1,54	17021,55	6,81
	M2	1207,07	1,45	24044,55	9,62
	M3	983,32	1,18	21516,83	8,61
B3	M1	1718,79	2,06	23077,43	9,23
	M2	1651,77	1,98	17070,29	6,83
	M3	1256,70	1,51	14591,30	5,84
C1	M1	334,78	0,40	5236,09	2,09
	M2	477,78	0,57	5863,74	2,35
	M3	500,78	0,60	5293,50	2,12
C2	M1	617,98	0,74	6492,80	2,60
	M2	399,83	0,48	5420,10	2,17
	M3	301,70	0,36	5495,44	2,20
C3	M1	296,65	0,36	6977,62	2,79
	M2	238,61	0,29	3563,73	1,43
	M3	266,93	0,32	-	-
P1	M1	3709,65	4,45	30299,84	12,12
	M2	3529,56	4,24	41557,64	16,62
	M3	3448,34	4,14	38718,47	15,49
P2	M1	3668,76	4,40	41860,41	16,74
	M2	4973,37	5,97	46961,77	18,78
	M3	4118,29	4,94	43332,78	17,33

## Anexo II – Resultados individuais de absorção de água por capilaridade





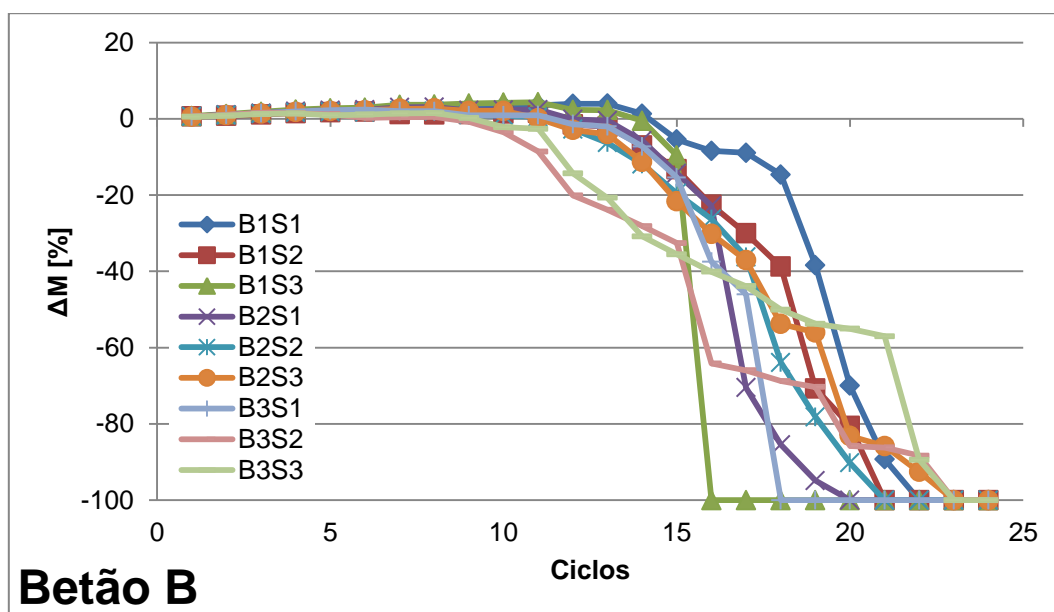
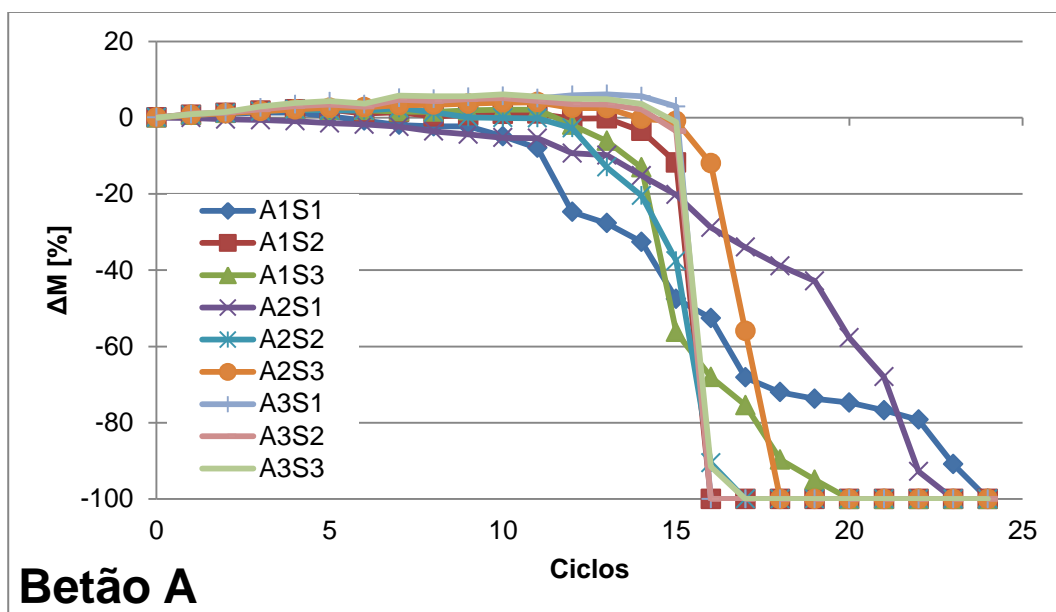
**Anexo III – Resultados individuais de secagem**

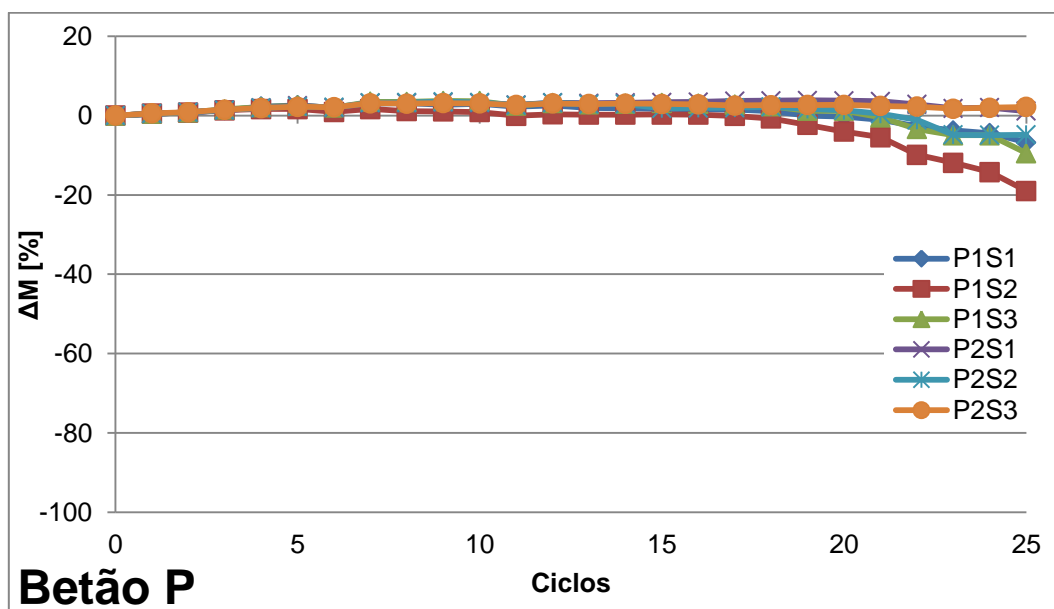
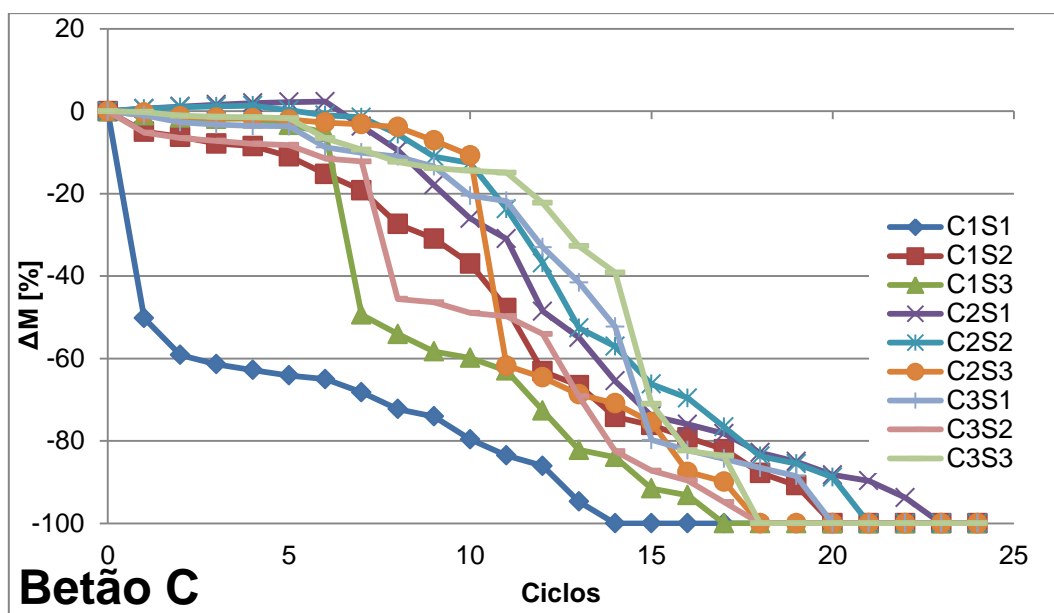


## Anexo IV – Resultados individuais de porosidade aberta e massa volúmica

Lajeta	Provette	M <sub>1</sub> [g]	M <sub>2</sub> [g]	M <sub>3</sub> [g]	P <sub>ab</sub> [%]	MV <sub>ap</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]
A1	M1	120,949	77,461	135,644	25,26	2078,77
	M2	88,747	52,246	100,221	23,92	1849,86
	M3	93,646	55,068	106,853	25,50	1808,36
A2	M1	272,812	161,264	307,125	23,52	1870,36
	M2	127,374	75,896	146,506	27,10	1803,91
	M3	-	-	-	-	-
A3	M1	35,730	21,176	45,408	39,94	1474,50
	M2	19,733	11,285	24,393	35,55	1505,42
	M3	32,134	18,091	39,702	35,02	1486,93
B1	M1	51,133	29,737	61,373	32,37	1616,29
	M2	66,487	36,351	78,919	29,21	1561,90
	M3	114,204	68,247	135,214	31,37	1705,38
B2	M1	69,130	40,800	81,108	29,72	1715,04
	M2	65,268	38,027	81,876	37,88	1488,47
	M3	100,013	58,887	116,705	28,87	1729,79
B3	M1	113,974	67,962	130,730	26,70	1815,80
	M2	99,986	58,598	120,440	33,07	1616,80
	M3	148,024	88,481	166,362	23,55	1900,64
C1	M1	71,944	42,180	85,300	30,97	1668,46
	M2	63,564	36,730	75,747	31,22	1629,14
	M3	-	-	-	-	-
C2	M1	136,073	81,930	157,112	27,98	1809,91
	M2	157,858	94,098	181,921	27,40	1797,46
	M3	160,048	94,514	185,644	28,09	1756,26
C3	M1	-	-	-	-	-
	M2	142,399	85,343	163,941	27,41	1811,74
	M3	48,794	28,180	57,684	30,13	1653,81
P1	M1	41,798	24,369	48,048	26,39	1765,19
	M2	75,615	43,670	82,510	17,75	1946,83
	M3	98,364	58,328	107,797	19,07	1988,40
P2	M1	94,955	56,036	103,421	17,87	2003,90
	M2	160,455	93,895	173,727	16,62	2009,91
	M3	106,924	63,487	116,438	17,97	2019,30
P1*	M1	27,776	16,958	29,963	16,82	2135,79
	M2	128,326	77,237	137,657	15,44	2123,90
	M3	164,873	99,702	176,766	15,43	2139,43
P2*	M1	66,496	39,987	71,481	15,83	2111,39
	M2	63,345	38,233	67,606	14,51	2156,57
	M3	95,205	57,234	102,216	15,59	2116,51



**Anexo V – Resultados individuais de resistência ao ataque por sulfatos**



## Anexo VI – Resultados individuais de dureza superficial

Betão	Lajeta	Face	Pontos	Leituras [Escala de Vickers]									
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	A1	Lisa	1	87	99	102	103	103	103	103	103	103	103
			2	103	106	106	102	102	101	96	105	106	106
			3	84	99	102	104	105	105	105	105	105	105
		Rugosa	1	68	92	93	105	99	109	110	107	110	110
			2	78	103	109	111	109	112	113	113	114	113
			3	58	88	97	95	100	102	103	104	89	101
	A2	Lisa	1	95	105	107	109	108	110	109	109	110	110
			2	95	108	110	111	112	112	112	112	112	112
			3	90	104	105	107	107	108	108	108	104	108
		Rugosa	1	30	62	77	82	84	86	85	87	86	86
			2	79	104	111	114	115	116	117	117	117	117
			3	60	82	87	89	90	91	91	92	93	93
	A3	Lisa	1	95	98	110	110	111	111	108	111	111	111
			2	96	110	113	113	113	114	113	112	113	113
			3	78	92	95	97	97	98	98	98	98	98
		Rugosa	1	53	80	89	93	95	98	98	98	100	100
			2	75	98	104	105	108	108	108	109	110	110
			3	38	73	88	93	95	96	97	97	98	98

Betão	Lajeta	Face	Pontos	Leituras [Escala de Vickers]									
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
B	B1	Lisa	1	78	95	99	100	100	101	101	101	102	101
			2	84	100	104	105	106	107	107	107	107	107
			3	73	89	93	95	96	97	97	97	97	98
		Rugosa	1	43	66	63	75	80	79	79	73	77	73
			2	64	88	94	96	98	98	99	100	100	100
			3	54	74	80	78	82	83	83	82	81	81
	B2	Lisa	1	79	91	98	103	104	104	106	106	108	107
			2	91	106	109	110	111	111	112	111	108	111
			3	88	102	104	105	105	105	105	105	105	105
		Rugosa	1	65	94	100	104	105	105	105	106	106	107
			2	58	85	95	99	102	103	104	104	105	105
			3	61	86	91	95	96	97	98	98	98	96
	B3	Lisa	1	67	85	92	94	95	95	96	96	96	96
			2	90	93	106	107	108	108	108	108	108	108
			3	81	96	100	100	102	100	102	103	103	104
		Rugosa	1	55	81	90	93	95	96	97	98	98	99
			2	68	91	98	100	101	103	103	103	103	103
			3	58	84	92	96	98	99	100	100	100	100


Betão	Lajeta	Face	Pontos	Leituras [Escala de Vickers]									
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C	C1-1ª Metade	Lisa	1	8	12	20	22	24	25	25	25	27	27
			2	10	21	27	31	35	37	38	38	40	42
			3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Rugosa	1	28	41	43	51	58	63	65	68	69	70
			2	25	40	51	58	62	65	68	69	71	69
			3	36	48	57	63	68	70	71	75	75	76
	C1-2ª Metade	Lisa	1	20	20	18	25	34	38	41	44	47	48
			2	33	42	46	50	51	52	52	52	52	52
			3	15	19	22	26	29	31	33	35	35	38
		Rugosa	1	40	51	51	50	49	46	45	43	42	47
			2	25	45	56	62	66	68	70	71	72	72
			3	25	25	27	29	32	36	40	43	47	50
	C3	Lisa	1	51	60	58	54	50	47	45	45	43	43
			2	50	59	60	60	58	57	56	55	54	53
			3	41	47	42	45	45	43	46	44	37	35
		Rugosa	1	12	23	26	28	29	29	30	30	30	31
			2	28	38	40	41	41	40	40	40	40	40
			3	19	35	44	50	54	56	56	57	57	58
	C3	Lisa	1	31	34	29	26	24	21	18	15	16	15
			2	29	35	34	28	26	16	12	9	7	8
			3	15	9	6	5	10	16	18	22	24	25
		Rugosa	1	O ensaio não foi realizado por quebra da lajeta									
			2										
			3										

Betão	Lajeta	Face	Pontos	Leituras [Escala de Vickers]									
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P	P1.1	Lisa	1	110	120	118	123	123	124	124	124	124	124
			2	130	139	139	141	142	142	142	142	142	142
			3	120	126	126	127	126	125	124	126	127	129
		Rugosa	1	95	118	123	123	124	118	123	123	124	123
			2	126	131	141	142	142	143	143	143	144	144
			3	110	124	126	127	128	128	127	128	128	128
	P1.2	Lisa	1	110	118	118	118	118	118	118	118	118	118
			2	125	137	139	139	140	141	141	141	142	142
			3	113	121	123	121	124	125	123	124	124	124
		Rugosa	1	89	108	113	115	113	116	109	118	118	118
			2	115	130	132	133	135	135	135	136	137	137
			3	100	115	119	120	121	122	122	123	123	123
	P2.1	Lisa	1	121	129	130	130	130	130	130	130	130	130
			2	138	143	144	145	145	145	145	145	145	145
			3	124	129	129	129	129	129	129	129	129	129
		Rugosa	1	93	117	120	122	123	116	125	125	125	125
			2	111	134	138	138	138	138	138	138	138	138
			3	67	101	111	115	118	118	120	121	121	121
	P2.2	Lisa	1	119	124	127	128	128	128	128	128	128	128
			2	139	145	146	146	146	146	146	146	146	146
			3	124	129	129	129	129	129	129	129	129	129
		Rugosa	1	88	91	101	101	101	103	104	104	104	104
			2	114	135	139	139	141	141	141	141	141	141
			3	64	89	95	99	99	98	102	105	109	112

Valores desprezados

## Anexo VII – Resultados individuais de tubos de Karsten

Betão	Lajeta	Face	Água absorvida [cm <sup>3</sup> ]				
			5'	10'	15'	30'	60'
A	A1	Lisa	0,5	0,9	1,3	2,3	4,0
		Rugosa	1,3	2,0	2,6	3,8	5,9
	A2	Lisa	0,4	0,6	0,8	1,5	2,7
		Rugosa	1,2	1,9	2,5	4,0	6,2
	A3	Lisa	0,7	1,1	1,6	2,6	4,4
		Rugosa	0,7	1,2	1,5	2,5	3,9
B	B1	Lisa	0,6	1,0	1,4	2,4	4,3
		Rugosa	0,7	1,1	1,5	2,6	4,2
	B2	Lisa	0,6	1,1	1,5	2,7	4,7
		Rugosa	1,2	1,9	2,5	4,3	6,2
	B3	Lisa	0,6	1,0	1,4	2,4	4,2
		Rugosa	0,5	0,8	1,2	2,0	3,3
C	C1	Lisa	1,3	2,3	3,2	5,8	10,6
		Rugosa	1,2	2,0	2,8	4,7	7,7
	C2	Lisa	2,0	3,1	4,2	7,2	13,1
		Rugosa	1,2	1,9	2,4	3,5	5,1
	C3	Lisa	1,2	1,8	2,3	3,8	6,6
		Rugosa	1,6	2,6	3,5	6,0	8,7
P	P1.1	Lisa	0,3	0,4	0,6	1,0	1,8
		Rugosa	1,1	1,6	2,2	3,5	5,9
	P1.2	Lisa	0,3	0,5	0,7	1,2	2,2
		Rugosa	0,9	1,3	1,8	2,9	4,9
	P2.1	Lisa	0,2	0,3	0,4	0,6	1,0
		Rugosa	0,7	1,1	1,4	2,3	3,7
	P2.2	Lisa	0,2	0,3	0,4	0,6	1,0
		Rugosa	0,7	1,1	1,5	2,4	3,9

 Valores desprezados

**Anexo IX – Resultados individuais de ultrassons**

		Velocidade [m/s]								
Lajeta		Leitura Indireta			Leitura Direta					
		Face Superior			Lateral Menor			Lateral Maior		
A1		1949	2090	1796	2687	2343	3419	1612	2130	2694
		1982	1969	2084	2289	2680	2698	2323	2634	2443
		1932	1708	1896	2297	2731	2695	2441	2675	2568
		1634	1799	1757	-	-	-	-	-	-
		1817	1472	1860	-	-	-	-	-	-
		2256	1882	1889	-	-	-	-	-	-
		1902	1719	2272	-	-	-	-	-	-
		1729	2100	2000	-	-	-	-	-	-
		1951	-	-	-	-	-	-	-	-
A2		1789	1690	1249	2704	2316	2051	2732	1939	1916
		1621	1943	1731	2502	2232	2276	2701	2646	2650
		1949	1842	1993	2113	2509	2714	1756	2673	2731
A3		1874	1898	1696	2654	2259	2064	2601	77	2584
		1752	1672	1861	2676	2403	2788	76	2808	80
		1670	1848	1921	2793	2244	2780	1984	75	2779
B1		1848	1720	1806	2265	1479	2243	2614	2728	2293
		1903	2142	1743	2312	1702	2263	2461	2730	2157
		2078	1988	1932	2456	1706	2755	2232	1766	2629
B2		1905	1912	2011	2409	2451	2222	2731	2750	2247
		2148	2053	2351	2732	2527	4239	2672	2763	2696
		1981	2253	2042	2740	2484	5106	1850	2699	2751
B3		1633	1810	1651	2403	1761	2098	2120	1604	1506
		1715	1671	1605	1804	1533	2283	2233	2207	2070
		1487	1609	1789	2079	1264	1464	1870	1396	2172
C1	Metade menor	969	1014	-	-	-	-	896	921	-
		886	1074	-	-	-	-	1299	1094	-
	Metade maior	1202	1098	-	-	-	-	1880	1326	-
		1050	1342	-	-	-	-	1254	1586	-
C2		1408	1182	985	852	982	908	1503	991	939
		1032	1215	1066	1066	917	1000	1335	1640	1123
		1013	1070	1142	983	657	622	923	1002	1485
C3		998	917	846	1136	734	672	957	937	477
		867	1006	877	758	536	414	810	913	651
		671	937	947	634	513	667	688	849	879



Lajeta	Velocidade [m/s]					
	Leitura Indireta		Leitura Direta			
	Face Superior		Laterais			
P1.1	2364	3120	3165	3041	2610	2613
	2249	2366	2972	3327	3209	1967
	2311	2154	3035	3225	2899	1686
	3044	2266	3288	2873	3211	2413
P1.2	2398	2706	3228	3573	3578	3004
	2119	2305	2992	3504	3393	2053
	2226	2146	3275	3404	3440	2517
	2633	2191	3140	2829	3521	3560
P2.1	2786	2484	3320	3787	2942	3345
	2465	2516	3063	3704	3606	1939
	2510	2547	3393	3601	3776	2334
	2866	2604	3351	3593	3867	3287
P2.2	2542	2918	2596	3617	3455	3254
	2387	2961	2600	3474	3556	1986
	2528	2338	2126	3387	3071	1972
	2416	2802	2822	3092	3900	2774

**Anexo IX – Resultados individuais de condutibilidade térmica**

	$\lambda$ [W/mK]												
Ponto	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	P1.1	P1.2	P2.1	P2.2
T1	1,19	1,28	1,25	1,45	1,56	1,32	1,24	1,19	1,07	2,02	2,10	2,27	2,18
T2	1,41	1,46	1,36	1,35	1,52	1,47	1,14	1,11	1,11	2,08	1,95	2,22	2,14
T3	1,34	1,38	1,28	1,39	1,48	1,39	1,24	1,14	1,1	2,01	1,97	2,23	2,16
T4	1,31	1,44	1,26	1,43	1,45	1,38	1,23	1,19	1,09	1,99	1,97	2,16	2,17
T5	1,4	1,23	1,24	1,35	1,49	1,52	1,05	1,18	1,09	-	-	-	-
T6	1,4	1,28	1,25	1,27	1,52	1,45	1,24	1,18	1,01	-	-	-	-
Med.	1,34	1,35	1,27	1,37	1,50	1,42	1,19	1,17	1,08	2,03	2,00	2,22	2,16

## Anexo X – Artigo 2º CIHEL



Congresso Internacional da Habitação no Espaço Lusófono  
2º CIHEL - LNEC - LISBOA - PORTUGAL - 13 A 15 MARÇO 2013

## CARACTERIZAÇÃO DE BETÃO COM TERRA PARA APLICAÇÃO EM CONSTRUÇÃO MODULAR PREFABRICADA

*Earth-concrete to precast modular building system*

Paulina Faria<sup>1</sup>, Vítor Silva<sup>2</sup>, Cátia Abreu<sup>3</sup>, Catarina Pereira<sup>4</sup>



Prof. Paulina Faria  
DEC – FCT UNL  
Caparica - Portugal



Eng. Vítor Silva  
DEC – FCT UNL  
Caparica - Portugal



Lic. Cátia Abreu  
DEC – FCT UNL  
Caparica - Portugal



Arq. Catarina Pereira  
DEC – FCT UNL  
Caparica - Portugal

<sup>1</sup>Dep. Eng. Civil, Universidade Nova de Lisboa (Prof. Associado, 2829-516 Caparica, paulina.faria@fdt.unl.pt)

<sup>2</sup>Dep. Eng. Civil, Universidade Nova de Lisboa (Bolseiro, 2829-516 Caparica, vmd.silva@fdt.unl.pt)

<sup>3</sup>Dep. Eng. Civil, Universidade Nova de Lisboa (Mestranda, 2829-516 Caparica, catiabreu@gmail.com)

<sup>4</sup>Dep. Eng. Civil, Universidade Nova de Lisboa (Bolseira, 2829-516 Caparica, cs.pereira@campus.fdt.unl.pt)

**Palavras-chave:** betão, cimento, agregado, solo, caracterização, sustentabilidade

### Resumo

Um betão é tradicionalmente efetuado a partir de uma mistura de agregados (britas) com cimento como ligante e água. No entanto, é possível realizar betões com outros agregados. O próprio solo pode ser utilizado como agregado, pelo menos parcialmente, em misturas que se designam por betão com terra.

No âmbito de um projeto QREN (Parede Ecoestrutural) que decorre em co-promoção entre a empresa ESLAM e a Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, estão a ser realizados estudos com vista ao desenvolvimento de soluções modulares prefabricadas para a execução de construção de pequeno porte, especialmente vocacionadas para países com necessidades prementes de construção. Entre outras tarefas, realizou-se um estudo em que se procurou caracterizar betões com terra (solo), mais sustentáveis e ecológicos, face a um betão convencional correntemente utilizado pela empresa. Para esse efeito, realizaram-se provetes de três betões com diferentes teores de cimento, solo e brita, que foram caracterizados e comparados com um betão de referência, realizado apenas com agregados correntes.

Neste artigo apresentam-se e discutem-se as características obtidas com as três composições de betão com terra, avaliando o efeito que maior ou menor percentagem de solo versus agregado corrente, e de cimento versus agregado com determinada percentagem de solo, pode introduzir no betão, em termos mecânicos e face à ação da água, com vista a potenciar a sua utilização na prefabricação de painéis modulares para construção de pequeno porte.

Verifica-se que os betões com terra com composições A e B apresentam valores muito semelhantes entre si na maioria das caracterizações efetuadas, muito embora a composição A seja a que contém traço cimento:agregado comparável ao do betão-padrão e o dobro de proporção de solo na fração de agregado

Caracterização de betão com terra para aplicação em construção modular prefabricada

Paulina Faria, Vitor Silva, Cátia Abreu, Catarina Pereira

utilizado; no entanto a composição B consegue atingir valores comparáveis com um traço em cimento:agregado mais fraco. Considera-se que betões do tipo dos A e B ensaiados podem ainda ser otimizados, mas parecem ser viáveis como betões mais sustentáveis para aplicação em prefabricação.

## 1. INTRODUÇÃO

Um betão é tradicionalmente efetuado a partir de uma mistura de agregados (britas) com cimento como ligante e água. No entanto, é possível realizar betões com outros agregados. O próprio solo pode ser utilizado como agregado, pelo menos parcial, em misturas que se designam por betão com terra.

As misturas de cimento e solo são geralmente estudadas ao nível do denominado solo-cimento, frequentemente utilizado para trabalhos geotécnicos, para a execução de taipa estabilizada com cimento ou para a execução de blocos de terra comprimida também estabilizados com cimento para a execução de alvenarias resistentes [1, 2, 3, 4]; no entanto, não são frequentes estudos sobre betão com solo, como é o caso que se apresenta neste artigo. São também frequentes estudos que relevam as vantagens térmicas, energéticas e ao nível da sustentabilidade de elementos construtivos com terra [5, 6, 7].

Este estudo enquadra-se num projeto mais abrangente, inserido no âmbito de investigação aplicada realizada num projeto QREN, em co-promoção entre a empresa ESLAM e a Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, com vista ao desenvolvimento de soluções modulares prefabricadas para a execução de construção de pequeno porte, especialmente vocacionada para aplicação em regiões com défice de construção. Nesta fase estão a ser desenvolvidos e caracterizados betões com solo, comparativamente a um betão corrente, para a execução de painéis modulares ecoestruturais para paredes. Esses painéis de betão, corrente ou mais ecológicos, serão complementados em obra com materiais locais que contribuam para o aumento da resistência térmica das paredes. Todo o sistema está a ser, em paralelo, desenvolvido ao nível da otimização da modulação e das soluções construtivas ao nível de ligações e complementos a executar em obra, adequação às necessidades e especificidades de construção de alguns mercados alvo da Comunidade dos Países de Língua Portuguesa, modulação e dimensionamento estrutural.

No âmbito deste artigo apresentam-se e discutem-se as características obtidas com três composições de betão com terra, comparativamente às de um betão corrente para aplicação em estrutura laminar modular, e avalia-se o efeito que maior ou menor percentagem de solo versus agregado corrente, e de cimento versus agregado com determinada percentagem de solo, pode introduzir no betão, em termos de comportamento mecânico e face à água, para avaliação do comportamento com vista a potenciar a sua utilização na prefabricação de painéis modulares para construção de pequeno porte.

## 2. CAMPANHA EXPERIMENTAL

Para avaliar a viabilidade de betões com solo, realizaram-se três betões com incorporação de cimento, solo e brita, que foram caracterizados e comparados com um betão de referência, realizado apenas com agregados correntes. Para a execução dos betões utilizou-se o cimento CEM II/B-L 32,5N, uma brita nº1 de origem calcária e um solo argiloso.

O betão de referência foi realizado com uma composição designada por P (padrão), constituída pela proporção em massa de 1:2:2 de cimento, areia e brita. Os betões com terra realizaram-se com três composições escolhidas pela empresa que produz elementos prefabricados de betão; entre eles varia o traço ponderal dos constituintes, tal como se apresenta no Quadro 1.

Como se pode aferir a partir desse quadro, de entre as composições de betão com terra, a composição A é a única que apresenta um traço cimento:agregado comparável ao do betão corrente utilizado usualmente pela empresa. Com efeito, a composição B apresenta um traço um pouco mais fraco em ligante e a C um traço muito mais fraco em ligante. No entanto, a proporção entre a brita e o solo utilizados como agregado é a mesma entre as composições B e C, sendo a proporção de solo no agregado o dobro no caso da composição A.

Caracterização de betão com terra para aplicação em construção modular prefabricada

Paulina Faria, Vitor Silva, Cátia Abreu, Catarina Pereira

Quadro 1: Composição ponderal dos betões analisados

Betão	Cimento:Solo:Brita	Cimento:Agregado(solo+brita)	Brita:Solo
A	1:3:1	1:4	1:3
B	1:3:2	1:5	1:1,5
C	1:6:4	1:10	1:1,5
P	1:2:2 [ci:areia:brita]	1:4 [ci:ag.(areia+brita)]	-

Com cada composição de betão realizaram-se três provetes cilíndricos com 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura e três lajetas retangulares com dimensões de 50 x 30 x 5 (cm). Os operários que executaram os provetes referiram ter mais dificuldades na execução e betonagem do betão C, comparativamente aos betões A e B e ao betão-padrão corrente P. Em cortes efetuados aos provetes para preparação de provetes de menores dimensões para a realização de alguns ensaios, verificou-se que os betões de composições A e B apresentavam-se mais homogêneos, com o solo bem distribuído na pasta de ligante, enquanto o betão C se apresentava com torrões de solo de grande dimensão, que chegavam a atingir 5 cm de maior dimensão, demonstrando um menor cuidado, talvez devido à maior dificuldade sentida na preparação dos materiais, homogeneização para a preparação do betão e na betonagem dos provetes.

Os provetes de betão com terra permaneceram em cura durante 10 meses a cerca de 70±5% de humidade relativa e 20±3°C de temperatura e foram, até à data, utilizados para a realização de diversos ensaios. Neste artigo serão apresentados apenas alguns dos resultados obtidos a partir das lajetas: em termos de condutibilidade térmica, módulo de elasticidade dinâmico através de ultrassons, resistência à flexão em três pontos e à compressão, absorção de água sobre baixa pressão (pela utilização de tubos de Karsten), absorção de água por ascensão capilar e secagem. Os resultados de cada ensaio derivam da média obtida das medições efetuadas num mínimo de três provetes de cada composição.

O estudo de caracterização destes betões com terra ainda se encontra em curso, estando todos os resultados obtidos com os provetes cilíndricos ainda em fase de tratamento de dados, o mesmo acontecendo com os resultados dos ensaios de resistência superficial por esclerómetro pendular, estabilidade dimensional térmica e hídrica. Alguns provetes e equipamentos estão a ser preparados para serem realizados os ensaios de resistência à compressão simples e diametral (provetes cilíndricos secos e húmidos), resistência à abrasão seca (desgaste a seco), resistência à ação de um jacto de água, determinação da porosidade e resistência à ação de sais. Também ainda por tratar encontram-se os resultados da caracterização da fração fina do solo por sedimentação e a análise por difração de raios X.

## 2.1 Caracterização do solo

A preparação da amostra de solo seguiu a Especificação de Ensaio E 195 [8] do LNEC. A análise granulométrica foi realizada com base nas Especificações de Ensaio E 196[9] e E239[10], também do LNEC. Apresenta-se, na Figura 1, a respetiva curva granulométrica, que mostra uma distribuição granulométrica extensa, com a maior parte das partículas com dimensão entre 0,1 mm e 1 mm.

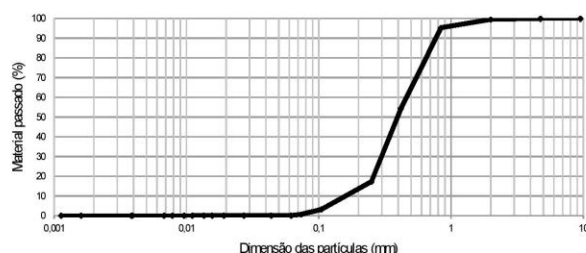


Figura 1: Curva granulométrica do solo utilizado

Caracterização de betão com terra para aplicação em construção modular prefabricada  
Paulina Faria, Vítor Silva, Cátia Abreu, Catarina Pereira

## 2.2 Condutibilidade térmica

A condutibilidade térmica dos provetes de betão foi determinada através da utilização de um equipamento ISOMET 2104, com uma sonda de contacto superficial de  $0,3-2,0 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$  após os provetes terem permanecido pelo menos 48h a 65% de humidade relativa e  $20^\circ\text{C}$  de temperatura, de acordo com a Ficha de Ensaio 1 do DEC-FCT UNL [11]. Nas lajetas foram efetuadas seis determinações na face lisa (em contacto com o molde). Apresentam-se, no Quadro 2, as condutibilidades térmicas médias e desvios-padrão obtidos para cada betão e, na Figura 2a, o ensaio em curso. Constata-se que os betões com terra registam uma redução da condutibilidade térmica de 37%, 32% e 46% (betões A, B e C), com desvio-padrão baixo. Num painel com uma espessura de 10 cm, uma condutibilidade térmica da ordem das destes betões de terra comparativamente à do betão-padrão P significa um aumento da resistência térmica mínimo de 40%, o que será significativo no conforto térmico.

Quadro 2: Condutibilidade térmica, módulo de elasticidade dinâmico e resistências à tração por flexão e à compressão dos betões

Betão	$\lambda \text{ [W/(m} \cdot ^\circ\text{C)]}$		$R_t \text{ [MPa]}$		$R_c \text{ [MPa]}$		$E_d \text{ [MPa]}$	
	Med	dp	Med	dp	Med	dp	Med	dp
A	1,32	0,08	1,89	0,47	8,01	1,43	6664	520
B	1,43	0,08	1,59	0,31	7,05	1,68	7202	496
C	1,14	0,07	0,46	0,15	2,22	0,40	1482	115
P	2,10	0,10	4,69	0,69	16,18	2,26	14578	498



Figura 2: Ensaios de condutibilidade térmica (a) e de ultrassons (b)

## 2.3 Análise por ultrassons para determinação do módulo de elasticidade dinâmico

A análise por ultrassons foi efetuada através de um equipamento Proceq Pundit-Lab, de acordo com a Especificação de Ensaio 13 e a Ficha de Ensaio 2 do DEC-FCT UNL [12, 13]. Avaliaram-se as dimensões e massa de cada provete e marcaram-se seis pontos na face superior (lisa) de cada lajeta e três pontos em cada uma das faces laterais. Na face superior os pontos foram marcados a 5 cm das extremidades e distando 20 cm entre si; nas faces laterais menores os pontos foram marcados a meia altura da face distando 5 cm das extremidades e 10 cm entre si, e nas faces laterais maiores os pontos foram marcados a 5 cm das extremidades e distando 20 cm entre pontos a meia altura da face. Efetuaram-se medições entre os pontos da face superior (propagação indireta), entre as faces laterais maiores e entre as faces menores (propagações diretas). Em cada uma das três lajetas de cada betão procedeu-se a um total de  $4 \times 4$  determinações na face superior em contacto com o molde, a diferentes distâncias, outras  $4 \times 4$  determinações na face lateral maior da lajeta e outras  $3 \times 3$  determinações na face lateral menor das lajetas, num total de 41 determinações por lajeta. Cada determinação resultou de três leituras em cada ponto.

Com base nos resultados do tempo de propagação das ondas ultrassónicas obtidos (tempo  $[\mu\text{s}]$ ) e as distâncias entre pontos, calculou-se o módulo de elasticidade dinâmico  $E_d \text{ [MPa]}$  através da expressão (eq. 1).



Caracterização de betão com terra para aplicação em construção modular prefabricada

Paulina Faria, Vitor Silva, Cátia Abreu, Catarina Pereira

$$E_d = V^2 \times M_{ap} \times \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$

em que:

V – velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas [km/s]

$M_{ap}$  – massa volúmica aparente do provete [kg/m<sup>3</sup>]

$\nu$  – coeficiente de Poisson

Considerou-se um coeficiente de Poisson de 0,3 (valor este que ainda será confirmado em ensaios mecânicos a realizar com os provetes cilíndricos). No Quadro 2 registam-se os valores médios e desvios-padrão do módulo de elasticidade dinâmico determinado para os betões e a Figura 2b ilustra a execução do ensaio.

Constata-se que o betão C apresenta um módulo de elasticidade dinâmico  $E_d$  que pode ser considerado demasiado baixo como material resistente, mas que os betões A e B apresentam valores semelhantes de  $E_d$  (ligeiramente superiores no caso do betão B, o que é congruente com os valores de condutibilidade térmica registados) que, sendo sensivelmente metade do apresentado pelo betão-padrão, podem ser considerados aceitáveis para elementos resistentes e induzem uma certa capacidade de deformabilidade superior à do betão-padrão, o que pode ser benéfico para situações de aplicação na construção modular.

#### 2.4 Resistência à tração por flexão e à compressão

Após a realização dos ensaios de determinação da condutibilidade térmica, de ultrassons e de absorção de água sob baixa pressão (que será apresentado a seguir), uma área de cada lajeta foi cortada, através de uma rebarbadora, em provetes de menores dimensões para a realização dos restantes ensaios. De cada lajeta foram cortados 6 provetes com 10x5x5 (cm) e 3 provetes com 15x5x5 (cm), num total de 66 provetes de menor dimensão e 33 provetes de maior dimensão, para serem utilizados em ensaios de resistência mecânica e comportamento face à água.

Os provetes de maior dimensão foram utilizados para a realização de ensaios de resistência à tração por flexão e à compressão, que foram realizados numa máquina universal Zwick, com célula de carga de 50 kN, com base na norma EN 1015-11:1999 [14]. Foram realizados os ensaios de tração a uma amostra de 3 provetes por lajeta, a cada uma de três lajetas de cada composição de betão, num total de 36 provetes. De seguida foram ensaiados à compressão metade dos provetes resultantes do ensaio de tração, perfazendo também um total de 36 provetes.

A resistência à tração por flexão  $R_t$  [MPa] foi obtida a partir da expressão (eq.2), em que  $F$  representa a força máxima [N],  $L$  [mm] o comprimento do provete entre os apoios,  $b$  [mm] a sua base e  $d$  [mm] a sua altura.

$$R_t = 1,5 \times \frac{F \times L}{b \times d^2}$$

O valor da resistência à compressão  $R_c$  [MPa] foi obtido através da expressão (eq.3), em que  $F$  representa a força máxima [N] exercida pela máquina e  $A$  [mm<sup>2</sup>] a área de compressão.

$$R_c = \frac{F}{A}$$

No Quadro 2 registam-se os valores médios da resistência medida para os betões. A partir desse quadro constata-se que os valores de resistência à tração são obviamente muito inferiores aos de compressão, em todos os betões, e que os betões A e B apresentam valores semelhantes, muito superiores aos do betão C e muito inferiores aos do betão padrão. Verifica-se ainda que a tendência entre os valores obtidos está de acordo com os valores previamente apresentados nos outros ensaios e que as resistências do betão C deverão estar diretamente ligadas às deficiências de homogeneidade do solo, uma vez que os grandes torrões de solo são bem visíveis nas secções de rotura (Fig. 3c).

Caracterização de betão com terra para aplicação em construção modular prefabricada

Paulina Faria, Vitor Silva, Cátia Abreu, Catarina Pereira



Figura 3: Ensaios de flexão (a), de compressão (b) e seções de rotura de um provete do betão C (c)

## 2.5 Absorção de água sob baixa pressão

A absorção de água sob pressão foi determinada com base em especificações de ensaio da RILEM [15] e do LNEC [16], de acordo com a Ficha de Ensaio 3 do DEC-FCT/UNL [17]. Em cada uma das lajetas, colocadas na vertical, foram colados três tubos de Karsten, segundo uma diagonal, de cada vez, em cada face (lado liso, resultante do contacto com a base do molde, e lado rugoso, exterior do molde), totalizando 78 ensaios com os tubos de Karsten. Foi aferida a área de contacto da água de cada tubo com a superfície do provete; geralmente conseguiu-se garantir, na colagem, a mesma área de contacto entre todos os tubos.

Encheram-se os tubos de Karsten até ao nível 0 cm<sup>3</sup> da escala do tubo e foram efetuadas leituras aos 5, 10, 15, 30 e 60 minutos, registando-se o valor de água absorvida pela lajeta. Quando o nível de água no tubo atingia os 4 cm<sup>3</sup>, a água era reposta de novo até ao nível 0 cm<sup>3</sup> e o ensaio prosseguia.

O total de água absorvida aos 60 minutos foi obtido por leitura direta [em cm<sup>3</sup>] da soma dos valores e o coeficiente de absorção de água a baixa pressão aos 60 minutos foi obtido pelo declive do segmento de reta traçado entre o início e o final do ensaio, na curva de absorção - um gráfico tendo como ordenada a massa de água absorvida por área de contacto da água do tubo com a superfície do provete [kg/m<sup>2</sup>] e tendo como abcissa a raiz quadrada do tempo decorrido [min<sup>0,5</sup>]. Estas grandezas são apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3: Absorção de água e coeficiente de absorção de água sob baixa pressão ao fim de 60 minutos dos betões

Betão	Abs.ÁguaBx.Pr. 60'' [cm <sup>3</sup> ]				Coef.Abs.ÁguaBx.Pr. 60'' [kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> ]			
	Face Lisa		Face Rugosa		Face Lisa		Face Rugosa	
	Med	dp	Med	dp	Med	dp	Med	dp
A	3,69	0,92	5,36	1,27	0,99	0,25	1,44	0,34
B	4,28	0,07	4,54	1,50	1,15	0,02	1,22	0,40
C	11,83	1,74	7,17	1,86	3,18	0,47	1,93	0,50
P	1,53	0,70	4,60	1,10	0,41	0,19	1,24	0,30

Para além dos valores de água absorvida e do coeficiente de absorção de água sob pressão ao fim de 60 minutos, a curva de absorção permite ainda acompanhar o desenvolvimento do ensaio. No Quadro 3 e na Figura 4c verifica-se que: o betão B é o que apresenta absorção de água mais similar entre as duas faces; a face lisa absorve menos água que a face rugosa nos diversos betões (exceto no betão C, onde a relação é inversa); o betão C é o que regista maior absorção de água; o betão-padrão absorve menor quantidade de água na face lisa, mas quantidade similar aos betões A e B na face rugosa.

A partir do andamento do ensaio, que se pode observar na Fig. 4b, constata-se que: a absorção de água pela face rugosa do betão C, embora no fim do ensaio se distinga do valor da face lisa, tem uma absorção inicial muito semelhante; que a maior absorção final da face rugosa do betão A se deve a uma rápida absorção inicial; a face rugosa dos betões B e P têm comportamento muito similar mesmo na absorção inicial; a face lisa do betão B, embora atingindo um valor final semelhante, tem uma menor absorção inicial; a absorção da face lisa



Caracterização de betão com terra para aplicação em construção modular prefabricada

Paulina Faria, Vitor Silva, Cátia Abreu, Catarina Pereira

do betão A, embora atingindo uma absorção final inferior à da face lisa do betão B, tem uma absorção inicial similar.

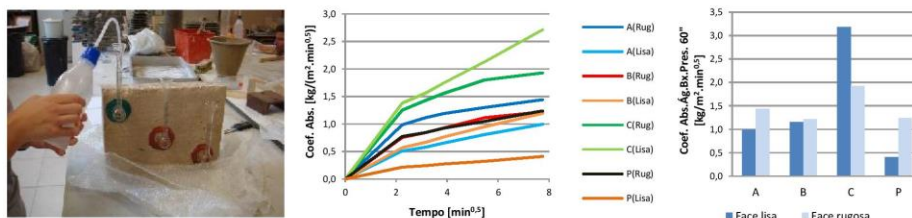


Figura 4: Ensaio de absorção de água sob pressão (a), curva de absorção de água (b) e coeficiente de absorção de água ao fim de 60 minutos (c) em cada face das lajetas de cada betão

## 2.6 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade foi determinada com base nas normas EN 15801:2009 [18] e EN 1015-18:2002 [19] e seguindo a Ficha de Ensaio 4 do DEC-FCT UNL [20]. As lajetas, com espessura de 5 cm, foram cortadas em peças com área de 10x5 (cm). Foram preparados e ensaiados seis provetes de cada lajeta, totalizando 18 provetes de cada betão - metade para contacto com a água com cada face distinta (face lisa da lajeta e face mais rugosa). Foram avaliadas as áreas das bases que iriam contactar com o filme de água e a massa seca dos provetes. O ensaio dos provetes de betão-padrão ainda se encontra em curso.

Após a secagem dos provetes em estufa para atingirem massa constante e o seu arrefecimento, as faces laterais dos provetes foram impermeabilizadas através da aplicação de uma película de polietileno e foi colocado um tecido fino de algodão na base de cada provete (para reter eventuais perdas de massa que viessem a ocorrer), fixado lateralmente por um elástico.

Estes foram colocados em contacto com um filme de água com altura de 5 mm sobre uma rede plástica, dentro de caixas estanques mantidas fechadas e com ambiente saturado em humidade. A sua massa foi sendo avaliada ao longo do tempo, permitindo estabelecer a curva de absorção capilar, com a massa por unidade de área da base em ordenada [kg/m²] e a raiz quadrada do tempo em abscissas [min<sup>0.5</sup>]. O coeficiente de capilaridade (CC), que traduz a velocidade com que a água é absorvida, corresponde ao declive do troço inicial de absorção da curva e foi comparado, em cada betão, entre os dois tipos de superfície em contacto com a água (lisa ou rugosa), não se tendo detetado grande diferença; daí apresentarem-se os valores médios por betão e não individualizados por face. O valor máximo de água absorvida por capilaridade corresponde ao valor assintótico da curva (VA). No Quadro 4 registam-se o coeficiente de capilaridade e o valor assintótico dos provetes obtidos das lajetas para todos os betões. A partir da Figura 5e do Quadro 4 constata-se que, de entre as três composições de betão com terra, a composição B apresenta o menor valor total de água absorvida por capilaridade e um valor baixo de coeficiente de capilaridade.

Quadro 4: Coeficiente de capilaridade, absorção de água por capilaridade, taxa de secagem e índice de secagem

Betão	CC [kg/m².min. <sup>0.5</sup> ]		VA [kg/m²]		IS [-]		TS [kg/m².h]
	Med	dp	Med	dp	Med	dp	Med
A	0,72	0,05	12,36	1,70	0,32	0,04	0,11
B	0,75	0,12	11,15	0,36	0,26	0,02	0,09
C	1,35	0,16	11,76	0,26	0,17	0,03	0,14
P							

Caracterização de betão com terra para aplicação em construção modular prefabricada

Paulina Faria, Vitor Silva, Cátia Abreu, Catarina Pereira

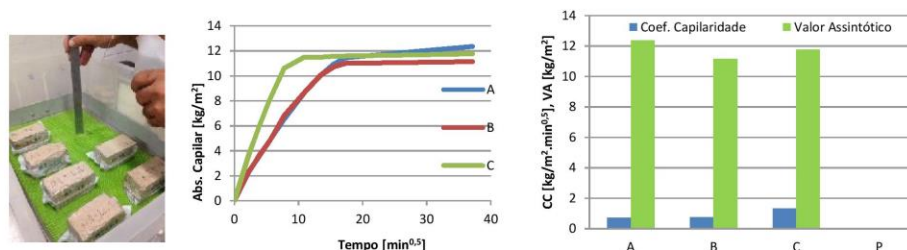


Figura 5: Ensaio de absorção de água por capilaridade (a), curva de absorção capilar (b), coeficiente de capilaridade e valor assintótico (c) de cada betão

## 2.7 Secagem

A capacidade de secagem dos betões foi determinada com base na especificação da RILEM [21] e de acordo com a Ficha de Ensaio 5 do DEC-FCT UNL [22]. À semelhança da capilaridade, também foram ensaiados 3 provetes com secagem pela face lisa e 3 provetes com secagem pela face rugosa, por lajetas (3 lajetas por composição de betão), num total de 54 provetes. Os ensaios do betão-padrão ainda se encontram em curso.

Após a saturação dos provetes no ensaio de capilaridade, estes foram retirados do contacto com o filme de água, aferida a sua massa e colocados na mesma posição sobre uma base impermeável e lisa, de modo à secagem da água absorvida apenas poder ocorrer pelo topo superior dos provetes, de área conhecida, em condições de 65% de HR e 20°C de temperatura. As medições da massa dos provetes decorreram de hora a hora durante as primeiras 5 horas e foram diárias nos dias seguintes, perfazendo um total de 816 horas.

A partir das pesagens ao longo do tempo foi-se determinando o teor de água (ou a massa de água remanescente por área de secagem), o que permitiu definir a curva de secagem com uma destas grandezas em ordenada e o tempo decorrido em abscissas. Determinou-se a taxa de secagem (TS), pelo declive do troço inicial da curva de secagem, e o índice de secagem (IS) de acordo com Brito et al. [23], usando simplificada uma aproximação a trapézios para a determinação do integral. Embora, e à semelhança da capilaridade, o ensaio tenha decorrido com secagem pela face lisa e pela face rugosa, os valores apresentados resultam da média de todos os provetes do mesmo betão, por não diferirem entre si. No Quadro 4 regista-se a taxa de secagem e o índice de secagem dos betões com terra já ensaiados. A partir desse quadro e da Figura 6 constata-se que a secagem dos três betões com terra decorre com facilidade e de forma semelhante nos primeiros tempos; a longo prazo a secagem é mais favorecida no betão C, sendo semelhante entre os betões A e B.

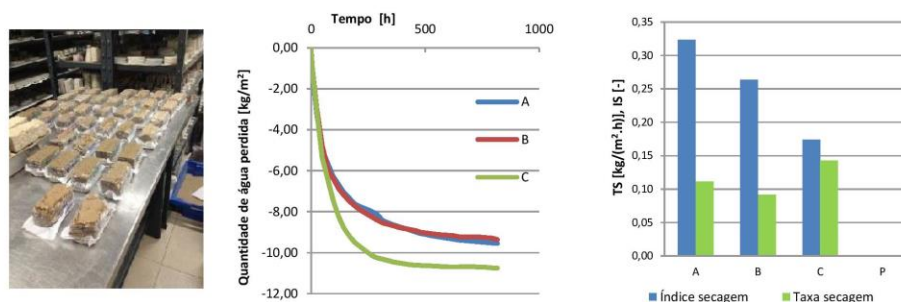


Figura 6: Ensaio de secagem (a), curva de secagem (b), taxa de secagem e índice de secagem (c) de cada betão

Caracterização de betão com terra para aplicação em construção modular prefabricada

Paulina Faria, Vitor Silva, Cátia Abreu, Catarina Pereira

### 3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O solo utilizado foi um solo corrente, recolhido da escavação de uma construção e que se encontrava disponível para ser utilizado, não tendo sido um solo especificamente escolhido. As composições dos betões foram escolhidas pela empresa de prefabricação. O betão-padrão apresenta um traço cimento:agregado igual à composição A; no entanto apresenta três partes da massa de agregado constituída por solo, enquanto o cimento-padrão contém apenas agregados correntes. A composição B apresenta um traço cimento:agregado mais fraco em ligante comparativamente aos betões padrão e A; no entanto, face ao betão A, apresenta uma menor quantidade de solo (e maior de agregado corrente) na fração de agregado. A composição C, embora possua uma fração de solo idêntica à de A no traço em agregado, foi realizada com um traço cimento:agregado muito mais fraco que todas as restantes. Especialmente nesta composição registou-se uma deficiente homogeneização do solo, detetando-se, nas secções de corte, grandes torrões na massa de betão, o que teve repercussões nos resultados de caracterização dos betões.

Verifica-se que os betões com terra com composições A e B apresentam valores muito semelhantes entre si na maioria das caracterizações efetuadas; o traço ligeiramente mais fraco em ligante da composição B é compensado pela maior fração em solo do agregado da composição A.

Em termos de condutibilidade térmica o acréscimo de resistência térmica pela utilização de um destes betões em comparação com o betão corrente pode ultrapassar 40% num painel de parede com 10 cm de espessura, o que pode ser considerado bastante significativo. Entre os betões A e B há uma ligeira vantagem para a composição A.

Os valores de módulo de elasticidade dinâmico e de resistências à tração por flexão e à compressão dos betões com terra apresentam uma diminuição significativa face ao betão-padrão; o betão C não é aceitável e a gama de valores registada pelos betões A e B tem de ser tida em conta na modelação estrutural a efetuar. Entre os betões A e B existe uma ligeira vantagem para o betão A.

Em termos da absorção de água no estado líquido sob baixa pressão, de novo o betão C apresenta comportamento deficiente e os betões A e B surgem com comportamento pior que o betão-padrão no contacto com a face lisa, mas muito semelhante a esse betão no contacto da água com a face rugosa. Num painel de betão A, B ou P, há mais vantagem em que seja a face lisa a colocada em contacto com o exterior; essa vantagem é mais relevante no caso dos betões P e A e menos no caso do betão B. Entre os betões A e B há uma ligeira vantagem do betão A no contacto com a face lisa e do betão B no contacto com a face rugosa.

Quanto à absorção de água por capilaridade, a comparação não pode ser efetuada ainda com o betão-padrão pelo facto do ensaio desses provetes estar ainda a decorrer. No entanto, é expectável que o betão-padrão apresente um melhor coeficiente de capilaridade mas um valor assintótico menos favorável comparativamente aos betões com terra - comparação que se conta poder demonstrar aquando da apresentação no congresso. Entre os betões com terra regista-se de novo um pior comportamento do betão C, especialmente face à água absorvida inicialmente; entre os betões A e B regista-se um melhor comportamento do betão B, com um início de absorção de água comparável ao betão A mas um total de água absorvida inferior.

Relativamente à libertação, por secagem, da água que acede à parede de betão ainda não há possibilidade de comparação com o betão-padrão. Através da taxa de secagem, que traduz a velocidade inicial de secagem, entre os betões com terra A e B verifica-se um melhor comportamento do betão A. Quanto ao índice de secagem, que traduz o comportamento de secagem a longo prazo, e que é tão facilitada quanto menor o seu valor, entre os betões A e B denota-se uma vantagem para o betão B. Embora só se venha a poder confirmar aquando da apresentação no congresso, é expectável que o betão-padrão venha a apresentar uma maior dificuldade de secagem face aos betões com terra.

### 4. CONCLUSÕES

As conclusões finais deste estudo só serão obtidas após a análise dos resultados de todos ensaios já executados e ainda dos programados para serem efetuados. Entre eles encontram-se mais ensaios de durabilidade de betões, que serão importantes para avaliar a sua viabilidade de uso face a betões correntes. No entanto, e face aos resultados obtidos ressalta:

Caracterização de betão com terra para aplicação em construção modular prefabricada

Paulina Faria, Vitor Silva, Cátia Abreu, Catarina Pereira

- a necessidade de uma correta homogeneização do solo com os constituintes secos do betão, para se obterem betões eficientes;
- o facto de betões do tipo dos A e B ensaiados indicarem ser viáveis como betões mais sustentáveis para aplicação em prefabricação;
- o interesse destes tipos de betões continuarem a ser estudados com vista à sua otimização e aplicação nomeadamente em prefabricação;
- as vantagens que, a nível tecnológico, económico e ambiental, podem existir pela utilização destes betões mais sustentáveis, que podem utilizar solo resultante de escavações e reduzir a necessidade de exploração de pedra natural como brita corrente.

## 5. AGRADECIMENTOS

Agradece-se o financiamento ao projeto PQREN/216586/2011 e aos Colegas do referido projeto.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Neves, C. – O uso do solo-cimento em edificações. A experiência do CEPED. V SIACOT – Seminario Iberoamericano de Construcción con Tierra, Mendoza, Argentina (CD-rom).
- [2] Neves, C. – Solo-cimento: dosagens e técnicas construtivas. Terra em Seminário 2007, Lisboa, Argumentum, 86-88.
- [3] Cid-Falceto, J. et al. – assessment of compressed earth blocks made in Spain: international durability tests. *Construction and Building Materials* 37 (2012), 738-745.
- [4] Arroyo, M. et al. - Simulation of cement-improved clay structures with a bonded elasto-plastic model: a practical approach. *Computers and Geotechnics* 45 (2012), 140-150.
- [5] Molina-Huelva, M. – La eficiencia energética de los materiales tradicionales. La construcción con tierra. Terra em Seminário 2010, Lisboa, Argumentum, 194-197.
- [6] Reddy, B.; Jagadish, K. - Embodied energy of common and alternative building materials and technologies. *Energy and Buildings* 35 (2003), 129-137.
- [7] Reddy, B.; Kumar, P. - Embodied energy in cement stabilized rammed earth walls. *Energy and Buildings* 42 (2010), 380-385.
- [8] LNEC – Solo. Preparação por via seca de amostras para ensaios de identificação. Especificação LNEC E 195:1966, Lisboa, 1966.
- [9] LNEC – Solos. Análise granulométrica. Especificação LNEC E 196:1966, Lisboa, 1966.
- [10] LNEC – Solos. Análise granulométrica por peneiração húmida. Especificação LNEC E 239:1970, Lisboa, 1966.
- [11] Faria, P.; Silva, V. – Determinação expedita da condutibilidade térmica. Ficha de Ensaio de Construção 1, DEC-FCT UNL, Caparica, 2012.
- [12] Henriques, F.M. – Pedras naturais e artificiais. Velocidade de propagação do som. Especificação de Ensaio 13, DEC-FCT UNL, Caparica, 1996.
- [13] Faria, P.; Silva, V. – Determinação expedita do módulo de elasticidade dinâmico por ultrassons. Ficha de Ensaio de Construção 2, DEC-FCT UNL, Caparica, 2012.
- [14] CEN - Methods of test for mortars for masonry. Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. EN 1015-11: 1999/A1: 2006. Brussels, 1999/2006.
- [15] RILEM TC 25-PEM – Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. Test nº II.4 – Water absorption under low pressure. *Materials & Structures* 13 (75), 205-207.
- [16] LNEC – Revestimentos de paredes. Ensaio de absorção de água sob baixa pressão. Ficha de Ensaio Pa39.1, Lisboa, 2002.
- [17] Faria, P.; Silva, V. – Determinação da absorção de água sob baixa pressão através de tubos de Karsten. Ficha de Ensaio de Construção 3, DEC-FCT UNL, Caparica, 2012.

Caracterização de betão com terra para aplicação em construção modular prefabricada

Paulina Faria, Vitor Silva, Cátia Abreu, Catarina Pereira

- [18] CEN – Conservation of cultural property. Test methods. Determination of water absorption by capillarity. EN 15801:2009. Brussels, 2009.
- [19] CEN – Methods of test for mortars for masonry. Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar. EN 1015-18: 2002. Brussels, 2002.
- [20] Faria, P.; Silva, V. – Determinação da absorção capilar de provetes friáveis. Ficha de Ensaio de Construção 4, DEC-FCT UNL, Caparica, 2012.
- [21] RILEM TC 25-PEM – Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. Test nº II.5 – Evaporation curve. Materials & Structures 13 (75), 205-207.
- [22] Faria, P.; Silva, V. – Determinação da capacidade de secagem de materiais porosos. Ficha de Ensaio de Construção 5, DEC-FCT UNL, 2012.
- [23] Brito, V. *et al.* - Coatings applied on damp substrates: performance and influence on moisture transport. J. Coating Technology and Research 8(4) (2011), 513-525.